



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**AVALIAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA TECNOVATES:  
UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROJETO  
IMPLEMENTADO E UMA PERSPECTIVA MAIS EFICIENTE**

Maurício Lorenzon

Lajeado, junho de 2018

Maurício Lorenzon

**AVALIAÇÃO DA USINA FOTOVOLTAICA TECNOVATES:  
UM ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O PROJETO  
IMPLEMENTADO E UMA PERSPECTIVA MAIS EFICIENTE**

Projeto de pesquisa apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte dos requisitos para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Prof. Dr. Ederson Pereira  
Madruga

Lajeado, junho de 2018

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento das perdas de geração de energia elétrica de uma usina fotovoltaica fixada sobre telhados de prédios da Univates - Tecnovates, com potência instalada de 937,12 kWp, bem como, realizar um estudo comparativo com uma usina equivalente instalada em solo com orientação e inclinação adequadas, utilizando condições climáticas de três fontes distintas. Neste sentido, objetiva-se realizar simulação do sistema proposto a fim de determinar a diferença no montante de energia gerada nos dois casos, estimar perdas, e determinar as eficiências das áreas da usina real. Com base nos resultados de simulação e uma estimativa de custo adicional, calculou-se a diferença dos ganhos em quatro cenários distintos, relacionando geração real e simulada com a modalidade de mercado livre e mercado cativo. Para as simulações foi utilizado o *software* PVsyst, além de fazer a validação dos resultados a partir da instalação e monitoramento da geração de dois módulos fotovoltaicos, por 14 dias, com as mesmas configurações utilizadas no *software*. A medição da energia gerada no protótipo foi realizada por meio de uma bancada de medição composta por transdutores de tensão e corrente contínua. Os dados de geração do protótipo foram superiores ao simulado, podendo-se atribuir a diversos fatores. No que diz respeito ao ganho, constatou-se diferenças consideráveis entre os quatro cenários.

**Palavras-chave:** Usina fotovoltaica. Eficiência. Perdas. Sistema ideal.

## **ABSTRACT**

This work has the objective of analyzing the losses of electric energy of a photovoltaic plant fixed on roofs of buildings of Univates - Tecnovates, with an installed capacity of 937.12 kWp, as well as to carry out a comparative study with an equivalent plant installed in soil with adequate orientation and slope, using climatic conditions from three different sources. In this sense, the objective is to simulate the proposed system in order to determine the difference in the amount of energy generated in the two cases, estimate losses, and determine the efficiencies of the real power plant areas. Based on the simulation results and an additional cost estimate, the difference in earnings was calculated in four different scenarios, relating real and simulated generation to the free market and captive market modality. For the simulations, the PVsyst software was used, in addition to validating the results from the installation and monitoring of the generation of two photovoltaic modules, for 14 days, with the same settings used in the software. The measurement of the energy generated in the prototype was carried out by means of a measuring bench composed by voltage and current transducers. The data of generation of the prototype were superior to the simulated one, being able to be attributed to several factors. With regard to gain, there were considerable differences between the four scenarios.

**Keywords: Photovoltaic power plant. Efficiency. Losses. Ideal system.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de irradiação solar do Brasil.....	21
Figura 2 - Efeito fotovoltaico .....	26
Figura 3 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica .....	26
Figura 4 - Curva tensão X corrente de uma célula PV .....	27
Figura 5 - Curva tensão X potência de uma célula PV .....	28
Figura 6 - Partes típicas de um módulo PV .....	28
Figura 7 - Esquema de um TPV .....	30
Figura 8 - Associação de células PV em série e paralelo.....	31
Figura 9 - Diagrama de sistema fotovoltaico autônomo.....	32
Figura 10 - Curva típica de eficiência de inversores fotovoltaicos em função da tensão e potência.....	33
Figura 11 - Massa de ar .....	35
Figura 12 - Irradiância em superfície inclinada .....	36
Figura 13 - Ângulos de instalação .....	36
Figura 14 - Curva Tensão x Corrente em função da irradiância (REC 260PE BLK).....	37
Figura 15 - Variação da eficiência em função da radiação global (REC 260PE BLK).....	37
Figura 16 - a - Resistência série; b - Resistência interna .....	39
Figura 17 - Curvas de tensão e corrente em função da temperatura .....	39
Figura 18 - Diodo de <i>by-pass</i> .....	40
Figura 19 - Eficiência dos módulos em função do tempo .....	41
Figura 20 - Diagrama da trajetória do Sol .....	46
Figura 21 - Diagrama de sombras de módulos a 15° .....	46
Figura 22 - Cálculo de ângulos distanciamento de módulos PV .....	47
Figura 23 – Protótipo teste: a) módulos; b) bancada de medição.....	49

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Geração média mensal simulada e real em kWh.....	52
Gráfico 2 – Energia gerada em função da potência instalada .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pré requisitos para conexão de SFCR .....	33
Tabela 2 - Redução da irradiância .....	35
Tabela 3 - Desempenho em função da sujeira em módulos PV .....	40
Tabela 4 - Dados dos arranjos .....	43
Tabela 5 - Especificações dos inversores .....	43
Tabela 6 - Dados de Geração Usina Tecnovates (out. 2016 a set. 2017) .....	44
Tabela 7 - Distribuição de módulos e inversores - Sistema proposto .....	48
Tabela 8 - Geração do sistema simulado .....	50
Tabela 9 - Variação de geração .....	51
Tabela 10 – Resultados de simulação 1 e dados de geração usina real .....	51
Tabela 11 – Perspectivas em diferentes cenários.....	53
Tabela 12 – Perdas na geração em função da temperatura, sombreamento e acúmulo de sujeira.....	54
Tabela 13 – Energia anual: real e simulado.....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS

AM	Massa de ar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo
BT	Baixa Tensão
C	Velocidade da luz no vácuo [ $2,998 \times 10^8$ m/s]
CA	Corrente alternada
CC	Corrente Contínua
TeCa	Telureto de Cádmio
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural
E <sub>F</sub>	Energia de um fóton [J]
E <sub>G</sub>	Energia de gap
E <sub>O</sub>	Energia de uma onda eletromagnética [J]
eV	elétron Volt
F	Frequência da onda eletromagnética [Hertz]
FF	Fator de Forma
G <sub>B</sub>	Irradiância direta [W/m <sup>2</sup> ]
G <sub>Bn</sub>	Irradiância direta normal [W/m <sup>2</sup> ]
G	Irradiação solar sobre uma superfície inclinada [W/m <sup>2</sup> ]
GD	Geração Distribuída



$G_{SC}$	Constante solar [valor médio 1366 W/m <sup>2</sup> ]
$G_T$	Irradiância
$h$	Constante de Planck [ $6,636 \cdot 10^{-34}$ Js]
H <sub>2</sub> O	Água
Hz	Hertz
$I_D$	Corrente do diodo [Amper]
$I_{PH}$	Fotocorrente
$I_{SC}$	Corrente de curto circuito
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
J	Joules
$k$	Constante de Boltzmann dos gases ( $1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K)
kW	Quilowatt
M	Metro
Mm	Milímetros
MT	Média tensão
MW	Megawatt
MWp	Megawatt pico
NIH	Núcleo de Informações Hidrometeorológicas – Univates
O <sub>3</sub>	Ozônio
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
$P_J$	Perda Joule [W]
$P_{MÁX}$	Potência máxima
PV	Fotovoltaico
$R_S$	Resistência série
$R_{SH}$	Resistência paralelo
S	Segundos
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
Si	Silício
SIN	Sistema Interligado Nacional

$T_c$	Temperatura Absoluta [Kelvin]
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto
$\mu m$	Micrômetro
$y_s$	Ângulo de elevação solar
$\lambda$	Comprimento de Onda [metro]

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivo .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1.1 Objetivos específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>14</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Geração distribuída.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Energias renováveis .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Energia solar.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.1 Radiação solar .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2 Energia solar fotovoltaica .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.2.1 Efeito fotovoltaico .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2.2 Células e módulos fotovoltaicos.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2.3 Tecnologias PV.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.2.4 Configurações de usinas.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.2.5 Perdas em sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>34</b>
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 O sistema PV em estudo.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Métodos.....</b>	<b>45</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>50</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1990, o Japão investiu em políticas de subsídio a sistemas fotovoltaicos, transformando-se no maior produtor de energia proveniente de módulos fotovoltaicos (PV) até 2006. Neste mesmo ano, a Alemanha tornou-se líder neste setor impulsionando a produção de células e consequentemente baixando os preços, sendo que em 2006 o custo por Watt pico beirava os \$6,00, caindo para \$0,30 por Watt em 2015. No Brasil a geração fotovoltaica ganhou força nos últimos anos devido a políticas governamentais e normas técnicas que viabilizaram a implementação de sistemas fotovoltaicos.

Neste cenário a eficiência dos sistemas fotovoltaicos é essencial a fim de aproveitar o máximo da radiação solar em todas as estações do ano. Esta pesquisa é um estudo de caso da Usina Fotovoltaica Tecnovates, que visa verificar a influência da temperatura, da orientação e ângulo de inclinação dos módulos PV na geração de energia elétrica.

Acredita-se que o montante de energia gerada em uma Usina Fotovoltaica sofre influência dos fatores citados acima, e de aspectos arquitetônicos da construção existente, podendo a geração ser otimizada a partir de uma adequação da instalação atual ou com a instalação do sistema no solo, de tal forma a permitir maior passagem de ar, contribuindo para a dissipação do calor dos módulos.

A pesquisa está dividida em quatro capítulos. O referencial teórico é composto por conceitos que embasam o estudo, subdividido em geração distribuída, energias renováveis e energia solar, onde são apresentadas questões relacionadas a radiação solar, efeito fotovoltaico, tecnologias, características de módulos PV e inversores, e perdas em sistemas fotovoltaicos.

No capítulo seguinte, são apresentadas as características da usina em estudo, descrição do sistema proposto e os procedimentos realizados para validação do estudo. Por fim, apresentam-se os resultados da pesquisa, fazendo um comparativo entre a energia gerada pela usina durante o período de 14 dias e de um protótipo instalado no solo, além da comparação entre o montante de energia gerada em um ano e os resultados das simulações de sistemas ideais, para o mesmo intervalo, realizando-se uma análise financeira de diversos cenários.

Na sequência serão apresentados os objetivos e justificativa do trabalho.

## **1.1 Objetivo**

Analisar o comportamento das perdas de geração de energia elétrica na Usina Fotovoltaica do Tecnovates, realizar um estudo comparativo com usina equivalente instalada em solo com orientação e inclinação adequadas.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- ✓ Apresentar a simulação de geração de um projeto instalado no solo com inclinação e orientação adequadas utilizando-se dos mesmos materiais da usina atual;
- ✓ Determinar o montante de energia que deixa de ser gerada no sistema fotovoltaico instalado nos telhados dos prédios da Universidade do Vale do Taquari - Univates, em comparação ao projeto simulado;

- ✓ Aferir a geração de energia diária em módulos PV instalados no chão de maneira adequada;
- ✓ Verificar qual inclinação x orientação da usina é mais eficiente e compará-la ao modelo ideal;
- ✓ Estimar as perdas de geração por sombreamento e demais fatores que influenciam no rendimento da usina real.

## **1.2 Justificativa**

A geração de energia por fontes renováveis ganhou força após a conscientização dos impactos ambientais causados pelos combustíveis fósseis, de tal forma que a energia solar, juntamente com a eólica ganharam prestígio pela eficiência e sustentabilidade (MATAVELLI, 2013). Observa-se, no Brasil, um crescimento acentuado da utilização de energia fotovoltaica, principalmente nos últimos cinco anos, devido a incentivos do governo junto com uma série de normas regulamentadoras (CARVALHO; MESQUITA; ROCIO, 2014).

Apesar de serem consideradas uma fonte limpa de energia e de origem renovável, muitas vezes, a máxima energia que pode ser extraída dos módulos, fica comprometida devido a instalação inadequada dos sistemas fotovoltaicos. Desta forma, esta pesquisa busca evidenciar o montante de energia elétrica que deixa de ser gerada, em uma determinada usina quando comparada a um modelo ideal.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Geração distribuída**

A inserção de parques de geração e pequenas centrais geradoras de energia elétrica a partir de unidades de consumo é denominada geração distribuída, também conhecida como geração local, geração embutida ou geração dispersa (REIS, 2011). Dentre as características, destacam-se o uso de geradores, conectados à rede de distribuição junto às unidades consumidoras (VILLALVA, 2012).

Em 17 de abril de 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 que permite e regulamenta a geração de energia elétrica pelos consumidores via fontes renováveis, geração distribuída (GD), sendo atualizada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015. Tal resolução está fundamentada nos benefícios que a GD pode proporcionar ao sistema elétrico, tais como, redução do carregamento das redes de transmissão e distribuição diminuindo assim as perdas elétricas, adiamento de gastos com expansão do sistema, aumento da confiabilidade e qualidade de energia, diversificação da matriz energética, entre outros (ANEEL, 2016; REIS, 2011). Desta forma, o Programa de Desenvolvimento de Geração Distribuída de Energia Elétrica, (ProGD) também estimula a instalação de sistemas fotovoltaicos, com metas de alcançar 23% de participação de energias renováveis até 2030 (ProGD, 2015).

Além dos benefícios ao sistema elétrico, a GD ganhou força no mundo inteiro devido às preocupações ambientais, pois é oriunda de fontes renováveis que apresentam menores impactos ambientais tanto no processo de fabricação, instalação e operação quando comparada a grandes centrais hidrelétricas ou usinas térmicas (REIS, 2011; VILLALVA, 2012).

A microgeração distribuída é caracterizada por centrais geradoras com potência instalada inferior a 75 kW, para fontes renováveis, conectada a rede de distribuição a partir de unidades consumidoras ou em casos de cogeração qualificada. Centrais geradoras de origem hídricas com potência instalada de 75 kW a 3 MW ou a fontes renováveis e cogeração qualificada, com potência instalada inferior a 5 MW, conectadas ao sistema de distribuição por meio de unidades consumidoras é caracterizada como minigeração distribuída (NBR, 687/2015).

Nestas configurações, caso o consumidor gerar mais do que o consumo, a rede elétrica serve como uma bateria virtual. Se a energia gerada for superior a energia consumida pela unidade, são gerados créditos que podem ser utilizados em até 60 meses após a data do faturamento ou dividido com demais unidades geradoras previamente cadastradas na mesma área de concessão (NBR, 687-2015).

O acréscimo em grande escala de centrais geradoras provenientes de fontes renováveis representa um grande desafio para a futura operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). A previsão de geração de fontes renováveis pode ser realizada a partir de previsões meteorológicas. Em grandes parques solares ou eólicos ocorre o monitoramento da geração instantânea, facilitando a operação do SIN, porém isto não ocorre em pequenas centrais geradoras o que impossibilita o operador visualizar instantaneamente se o aumento da carga líquida do sistema é oriundo do acréscimo de demanda ou do decréscimo da geração (TOLMASQUIM, 2016).

A fim de garantir a estabilidade do sistema muitos aparatos podem ser utilizados, como a aplicação de mecanismos de armazenamento de energia em momentos de maior geração ou, a utilização de geradores flexíveis a fim de acomodar a alternância de geradores solares e eólicos. Turbinas a gás, motores de



combustão e usinas hidrelétricas compõe a gama de possibilidades por apresentarem ampla faixa de operação e rápido acionamento/desligamento, além do baixo custo de ciclagem e alto *ramp rate* (TOLMASQUIM, 2016).

Atualmente, dentre diversas fontes renováveis, as usinas solares fotovoltaicas são a base da GD, acompanhadas de turbinas a gás, sistemas de ciclos combinados pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), sistemas eólicos, (69,69; 14,39; 8,33; 7,58% da capacidade instalada, respectivamente) e células a combustível (MME, jun. 2016; REIS, 2011; VILLALVA, 2012). A GD, no Brasil, conta com 132 MW instalados, o que representa 0,1% da capacidade total instalada (MME, jun, 2016).

## **2.2 Energias renováveis**

De maneira geral e simplificada, os sistemas energéticos são constituídos por determinados processos visando a transformação da energia da natureza em outra forma de energia, adequada para atender as demandas da sociedade (VIANA, et al 2012). Atualmente, a energia elétrica é fundamental tanto para o bem-estar da população quanto para o desenvolvimento econômico, científico e tecnológico (ELETROBRAS, 2017).

Visando o bem-estar da população e o desenvolvimento de uma cultura anti desperdício dos recursos naturais, o Governo Federal criou por meio de decreto presidencial, o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo (CONPET). Os principais objetivos do programa são reduzir a emissão de poluentes, racionalizar o consumo de petróleo e derivados, bem como, fornecer apoio técnico para o aumento da eficiência energética (CONPET, 2012).

Alicerçado no CONPET e em outros aspectos legais, observa-se uma crescente utilização de energias oriundas de fontes renováveis. Na parte de energia elétrica, as fontes renováveis apresentam um crescimento mais acelerado, do que sistemas de geração a combustíveis fósseis nos últimos anos (MME, jun. 2017).

A capacidade instalada de usinas de geração de energia elétrica no Brasil em junho de 2016 era de 144.983 MW, aumentado para 152.980 MW em junho de 2017, o que representa um acréscimo de 5,5%. Dentre as fontes de energias renováveis em ascensão, destaca-se a biomassa (9,2%), eólica (7,0%) e a solar com apenas 237 MW (0,2%), dos quais 92 MW são GD, e 145 MW não são GD, o que representa 16,4% da capacidade instalada (MME, jun. 2017).

Muitos são os benefícios das fontes renováveis, dentre os quais destacam-se o desenvolvimento sócio-econômico, redução da poluição e diversidade da matriz energética. A energia eólica, biomassa, geotérmica, oceânica, hidrogênio e solar são algumas das alternativas de geração de energia limpa e sustentável (KALOGIROU, 2016).

Proveniente da energia cinética do ar, a energia eólica começou a ser utilizada para gerar eletricidade no final do século XIX, porém, apenas no final da década de 1970 e no decorrer da década de 1980 que teve mercado no Brasil (TOLMASQUIM, 2003). Com os avanços tecnológicos e incentivos governamentais a tecnologia ganhou força no Brasil, sendo que em março de 2013 a capacidade instalada em energia eólica superou a capacidade instalada de energia nuclear (MME, mar, 2014). Apesar disso, apenas em 2015 a geração eólica de eletricidade superou a de origem nuclear (MIRANDA, 2016).

A energia elétrica gerada por intermédio da decomposição de material orgânico, denominada energia da biomassa, é dividida em biomassa lenhosa e biomassa não lenhosa (KALOGIROU, 2016). Em geral, culturas energéticas possuem custo mais elevado do que resíduos orgânicos, urbanos, industriais, sendo estes as principais fontes de matéria prima (UCZAI; TAVARES; FILHO, 2012). Dentre muitos materiais que podem ser utilizados para geração de energia a partir biomassa, destaca-se, a madeira florestal, resíduos das indústrias florestais, como de papel e celulose, culturas energéticas (biomassa lenhosa), dejetos de animais, resíduos urbanos e agrícolas, culturas de açúcar e oleaginosas (biomassa não florestal) (IEA, 2007; KALOGIROU, 2016).

A energia térmica proveniente do interior da terra pode ser transformada em energia elétrica a partir de usinas termelétricas. O calor interior é extraído por meio

de poços naturais (geiser) ou artificiais, a fim de aquecer a água e consequentemente gerar vapor, utilizado para mover as turbinas dos geradores. Plantas de vapor rápido, vapor seco e binárias são as três tecnologias utilizadas para o aproveitamento destes recursos (UCZAI; TAVARES; FILHO, 2017).

Ainda em fase de estudos no Brasil, a energia oceânica pode ser transformada em energia elétrica, sob diversas formas, através das ondas e marés, correntes marítimas, gradiente de salinidade e térmico, biomassa marinha e da energia eólica (SANTOS, 2013). Apesar do fluxo total de energia oceânica ser grande, apenas uma pequena parcela é passível de exploração nos próximos anos em função da baixa densidade e a disponibilidade afastada dos grandes centros de consumo (REIS, 2011).

O hidrogênio, elemento mais abundante do universo, é um portador de energia, que pode ser obtido a partir da água, biomassa e combustíveis fósseis. Para a extração do hidrogênio da água, utiliza-se um processo denominado *eletrólise*, que nada mais é do que separação de elementos a partir da corrente elétrica. Entretanto, a utilização de fontes renováveis de energia no processo extração, torna-o mais caro quando comparado a utilização de fontes de energia elétrica convencionais. A tendência é que o hidrogênio seja utilizado para a transformação direta em energia elétrica, a partir das células de combustível (KALOGIROU, 2016).

No âmbito da utilização da energia solar para geração de eletricidade, existem duas tecnologias, usinas heliotérmicas e sistemas fotovoltaicos (SANTOS, 2013), que são o foco desta pesquisa.

## **2.3 Energia solar**

Praticamente todas as formas de energia conhecidas hoje possuem uma colaboração do Sol. Como consequência da utilização do Sol para a realização de processos fotossintéticos, a partir da origem vegetal, obtém-se o carvão, a madeira,

o gás natural e o petróleo. Além destas, a energia eólica e oceânica, só ocorrem devido a diferença de temperatura em diferentes regiões do planeta (KALOGIROU, 2016).

O Brasil é um país privilegiado no que diz respeito a radiação solar, pois possui a maior parte de seu território localizado entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio. Nesta faixa da Terra, a incidência dos raios solares é mais vertical, favorecendo os índices de radiação solar durante todo ano. Isto é o fator mais importante para a geração de energia solar, seja a partir de sistemas fotovoltaicos ou de centrais de geração a partir do aquecimento d'água (TOLMASQUIM, 2016).

A geração heliotérmica, consiste na concentração da radiação solar sobre um ponto específico, onde o fluido é aquecido para posterior utilização (SANTOS, 2013). Um sistema termossolar completo possui quatro etapas básicas: coletor, receptor, transporte-armazenamento e conversão elétrica, realizada por conversores, geradores elétricos semelhantes aos utilizados em centrais térmicas de origem fóssil (REIS, 2011).

Plantas termossolares podem operar em temperaturas bem elevadas como no caso de coletores concentradores ou em temperaturas mais baixas, casos de lagos ou torres solares. Dentre os sistemas que operam em alta temperatura, destacam-se o de coletor de calha parabólica, torre central, disco parabólico e o sistema refletor linear de Fresnel, que ainda não atingiu maturidade industrial (KALOGIROU, 2016).

Conforme mencionado, a geração heliotérmica prevê a conversão da radiação em calor, no aquecimento do fluido, e posteriormente a conversão de energia cinética em energia elétrica por meio de um gerador elétrico, resultando em um sistema mais complexo. Em contrapartida, os sistemas fotovoltaicos convertem diretamente a radiação solar em energia elétrica a partir de dispositivos sólidos (KALOGIROU, 2016).

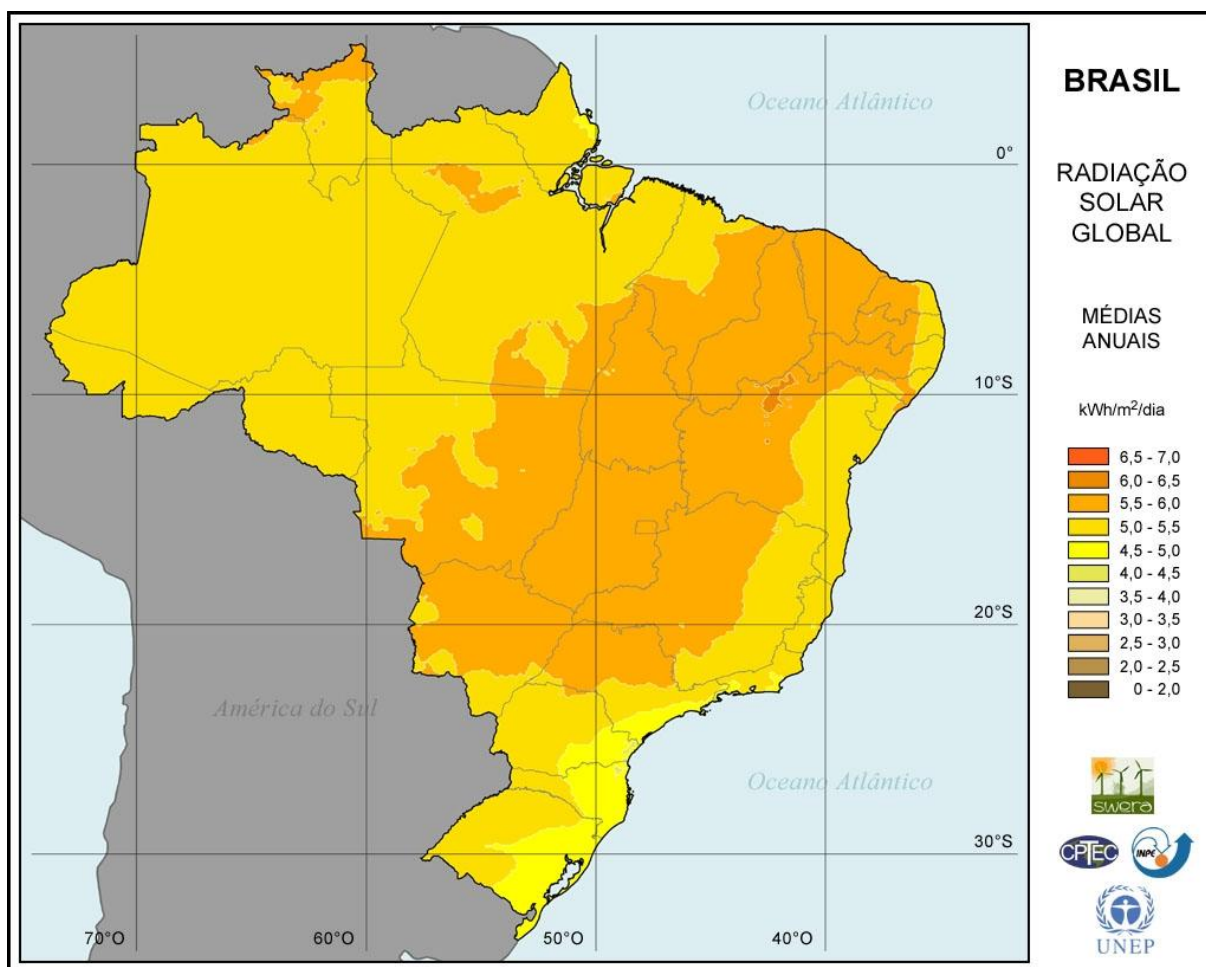
No atual cenário da matriz energética nacional, a geração fotovoltaica representa apenas 0,2 % da potência instalada, dados de junho de 2017 (MME jun, 2017). Entretanto, observa-se um crescimento de 930,5%, da potência instalada de

sistemas fotovoltaicos em um ano (531,5% em sistemas não GD), seguido pela energia eólica que apresentou um crescimento anual de 18,7% (18,6 % não GD) (MME, jun. 2016).

### 2.3.1 Radiação solar

Os níveis de radiação diária média no nordeste brasileiro ficam em torno de 6 kW/m<sup>2</sup>, enquanto na região sul e sudeste é de 4 a 5 kW/m<sup>2</sup>, (Figura 1), valores superiores aos da Alemanha, 3,4 kW/m<sup>2</sup>, que conta com 39,7 MW de potência instalada em energia fotovoltaica (MME, 2015; TOLMASQUIM, 2003).

Figura 1 – Mapa de irradiação solar do Brasil



Fonte: solarpaces.org

O montante de radiação eletromagnética, energia radiante, que determinado corpo emite, varia de acordo com sua energia interna, sendo esta proporcional a sua temperatura (SANTOS, 2013). A energia radiante é transportada por meio de ondas eletromagnéticas, como por exemplo, a energia proveniente do Sol, transmitida à terra através do espaço. A energia destas ondas é diretamente proporcional à frequência, a qual é inversamente proporcional ao comprimento de onda (VILLALVA, 2012).

Em uma das suas teorias Max Planck descreveu que a temperatura irradiada por um determinado corpo depende da sua temperatura, a qual está associada a uma frequência, ou seja, a uma cor. Isto deu origem a teoria da mecânica quântica (UFRGS).

Nesta mesma linha, Planck afirmou que as ondas eletromagnéticas carregam determinados pacotes de energia, *quantum* (no plural *quanta*), também chamados de fótons, que possibilitam a troca de energia entre a radiação e a matéria (SILVA, 2010; ZILEZ, 2012). A energia de um fóton em Joules (J), pode ser calculada pela Equação 1.

$$E_F = \frac{\lambda h}{c} \quad (1)$$

Em consonância a isto, a energia de uma onda eletromagnética (J) pode ser calculada pela equação de Planck-Einstein (EQUAÇÃO 2).

$$E_O = hf \quad (2)$$

Em 1881, Langley propôs um método para determinar a constante solar ( $G_{SC}$ ), inicialmente medida em Langleys por minuto (calorias por centímetro quadrado por minuto), posteriormente modificada para Watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ), sendo o fator de conversão de  $cal/cm^2 \cdot min$  para  $W/m^2$  igual a 697,8. A  $G_{SC}$  é “a quantidade de energia solar por unidade de tempo, a uma distância média da Terra a partir do Sol, recebida em unidade de área de uma superfície normal ao Sol fora da atmosfera terrestre” (KALOGIROU, 2016, p.91).

Próximo ao dia 3 de janeiro, quando a Terra está mais próxima do Sol,  $G_{SC}$  é superior a  $1400 \text{ W/m}^2$ , enquanto que, próximo ao dia 4 de julho, a  $G_{SC}$  é de aproximadamente  $1330 \text{ W/m}^2$ , desta forma a radiação que chega a superfície da Terra varia de acordo com o dia do ano (KALOGIROU, 2016).

### **2.3.2 Energia solar fotovoltaica**

Desde a década de 1950, sistemas solares fotovoltaicos são utilizados com o intuito de gerar energia para projetos espaciais. Entretanto, apenas duas décadas depois, começaram a serem utilizados como fonte de energia elétrica na Terra. Esse fato se deu a partir da crise energética no início da década de 1970 que impulsionou o uso desta fonte de energia. No fim da mesma década, a geração de energia na Terra superou a gerada em sistemas espaciais (TOLMASQUIM, 2003).

O Brasil também não fica para trás na geração de energia fotovoltaica, porém tem muito a evoluir e investir nesse setor. A crise energética de 2001, foi um dos marcos históricos que viabilizaram a inserção de fontes alternativas na matriz energética brasileira (BARDELIN, 2004). Além disto, a REN 482/2012, sendo atualizada pela REN 867/2015, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012; ANEEL, 2015), viabilizou a regulamentação de micro e mini gerações a serem conectadas ao sistema de distribuição no país.

A Chamada de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) Estratégico 013/2011, foi mais uma ação institucional importante da ANEEL para a promoção da energia fotovoltaica no cenário nacional. Nesta chamada, 17 projetos foram aprovados, de diversas tipologias de instalação, totalizando 24,6 MWp instalados, executados entre 2014 e 2015 (TOLMASQUIM, 2016).

Estes eventos promovem os sistemas fotovoltaicos como sendo a base da geração distribuída no Brasil. Além de usinas, eles podem ser instalados em residências em meio a grandes centros urbanos, por se adaptarem a qualquer tipo de espaço, sejam telhados ou fachadas, sem emitir poluição (VILLALVA, 2012).

### 2.3.2.1 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez em 1939 pelo físico francês Edmond Becquerel, é a transformação da energia luminosa em energia elétrica. Este efeito pode ser explicado cientificamente graças às descobertas, do físico alemão Max Planck na virada do século XIX para o século XX (ZILES, 2012), conforme apresentadas no Item 2.3.1.

No contexto da energia fotovoltaica, essas descobertas foram de suma importância para explicar a interação entre a radiação eletromagnética e os semicondutores, matéria prima para a confecção de células fotovoltaicas. Os semicondutores são caracterizados por possuírem faixas de energia, na qual existe a banda de valência, onde os elétrons estão fracamente ligados ao núcleo, e a banda de condução, estágio de maior energia onde os elétrons estão livres para circular pelo material (BRAGA, 2008; KALOGIROU, 2016; ZILES, 2012).

Para melhor compreensão da banda de valência e da banda de condução, pode-se fazer uma analogia a um recipiente com determinado líquido de alta densidade, onde as bolhas se concentram na parte superior, representando a banda de valência, enquanto os elétrons da banda de condução podem ser comparados a bolas mais densas que o líquido, que se acumulam no fundo do recipiente (PINHO; GALDINO, 2014).

O hiato de energia entre a banda de valência e a banda de condução, também denominada de energia de gap ( $E_G$ ), determina se o material é um isolante, condutor ou semicondutor. Materiais condutores são aqueles em que a banda de valência é praticamente vazia, enquanto que na banda de condução podem existir alguns elétrons, de tal forma que ambas se sobrepõem. Em contrapartida, para materiais isolantes, a  $E_G$  é extremamente alta, na ordem de 6 elétron-Volt (eV), o que impede a migração de elétrons de uma banda de menor energia, banda de valência, para a banda de maior energia, banda de condução. A estrutura dos



semicondutores é muito semelhante a dos materiais isolantes, porém a  $E_G$  é menor, inferior a 3 eV (BRAGA, 2008; KALOGIROU, 2016).

O átomo de silício (Si), elemento fundamental na confecção de células fotovoltaicas, possui quatro elétrons na banda de valência que ligado aos seus vizinhos formam uma rede cristalina. A dopagem do Si a partir de átomos com cinco elétrons na camada de valência, forma um semicondutor com elétrons livres, denominado *semicondutor tipo n*. Semicondutores do tipo *n* são eletricamente neutros, porém apresentam um excesso de elétrons fracamente ligados ao núcleo, estando disponíveis para condução (PINHO; GALDINO, 2014).

O fósforo (P) é o material mais utilizado para a dopagem tipo *n*, contudo também podem ser utilizados arsênio (As) e antimônio (Sb), elementos do grupo 5 da tabela periódica (BRAGA, 2008).

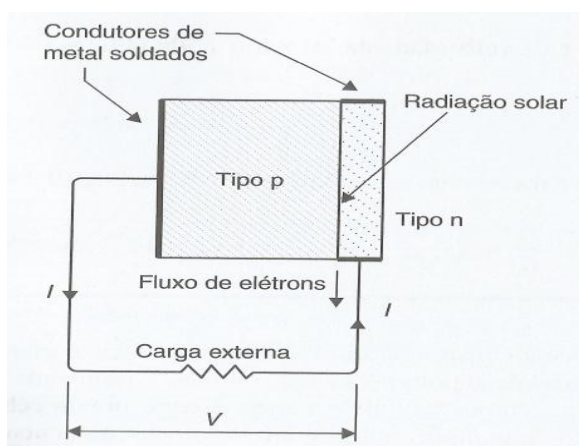
Em contrapartida, os semicondutores do *tipo p*, compostos por redes cristalinas de Si dopadas com elementos do grupo 3 da tabela periódica, apresentam uma falta de elétrons, também denominada de lacunas positivas que movem-se pelo cristal por difusão ou deriva. Os materiais mais utilizados para a dopagem do *tipo p* são o gálio (Ga) ou índio (In) (KALOGIROU, 2016).

Uma célula fotovoltaica básica, é composta por uma delgada camada de Si do *tipo n* (0,5  $\mu\text{m}$ ) e por uma camada mais espessa de Si *tipo p* (0,25 mm), formando assim uma *junção p-n* (FERREIRA, 2014; KALOGIROU, 2016; VILLALVA, 2012). O semicondutor do *tipo n* é a parte frontal da célula que ficará exposta à radiação, possibilitando a absorção da energia dos fótons pelos elétrons. Quando isso ocorre “a energia do elétron é aumentada pela energia do fóton” (KALOGIROU, 2016, p.486).

Quando a radiação solar é absorvida pelo semicondutor da célula solar, a energia dos fótons dá origem a pares de elétrons lacunas. Se este par está perto o suficiente da *junção p-n*, o seu campo elétrico possibilita a separação, fazendo com que as lacunas se movam para o lado do *tipo p*, enquanto os elétrons movem-se para o lado do *tipo n*. Com ambos os lados da célula interligados por uma carga

elétrica, fluirá uma corrente elétrica, fotocorrente ( $I_{PH}$ ), enquanto a radiação atinge a célula solar (FIGURA 2) (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 2 - Efeito fotovoltaico



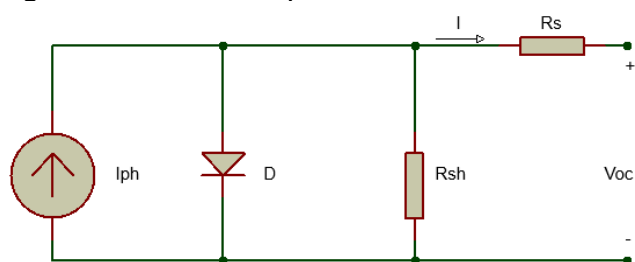
Fonte: Adaptado de Kalogirou, p. 487, 2016.

Na ausência de radiação solar, que dá origem ao campo elétrico, o elétron se recombina com o átomo, dando origem a um diodo (KALOGIROU, 2016).

### 2.3.2.2 Células e módulos fotovoltaicos

O circuito equivalente de uma única célula solar pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



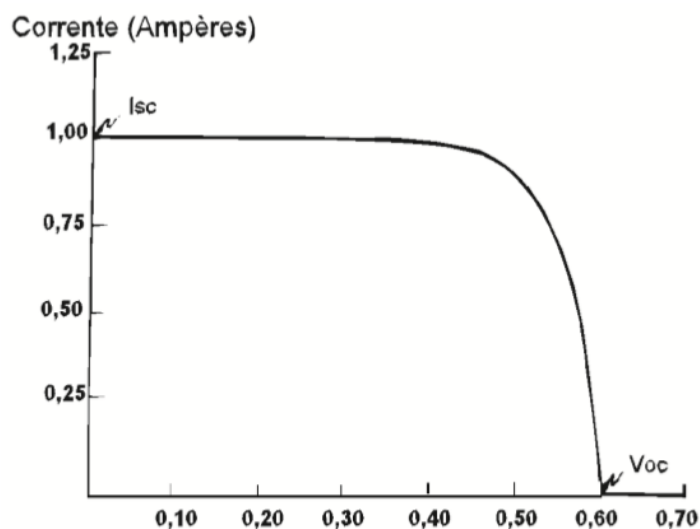
Fonte: Adaptado de Kalogirou, p. 489, 2016.

Conforme ilustrado, a célula solar é representada por uma fonte de corrente,  $I_{PH}$ , com um diodo, e uma resistência interna ( $R_{SH}$ ), em paralelo com a fonte de corrente e uma resistência série interna da célula, ( $R_S$ ). Desta forma, a corrente líquida da célula é calculada pela Equação 5 (KALOGIROU, 2016).

$$I = I_{ph} - I_D \quad (3)$$

A potência de uma célula fotovoltaica é dada pelo produto da tensão pela corrente. A Figura 4 representa a curva característica tensão-corrente (I-V) para uma determinada irradiância,  $G_T$ , a uma temperatura fixa (ZILES, 2012).

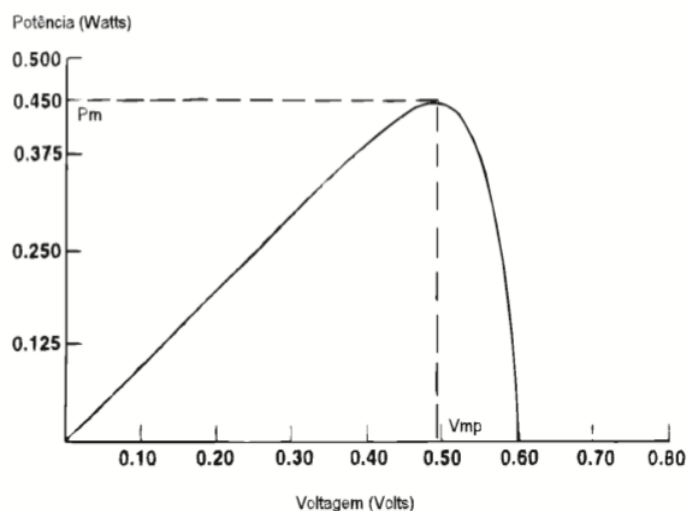
Figura 4 - Curva tensão X corrente de uma célula PV de Si monocristalino



Fonte: GTES, P.46, 2004.

Na Figura 5, apresenta-se a curva característica Potência-Tensão (P-V) das células fotovoltaicas. A potência máxima ( $P_{MÁX}$ ) pode ser calculada pelo produto da corrente de curto circuito ( $I_{SC}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), e fator de forma (FF) (EQUAÇÃO 4) (GTES, 2004).

Figura 5 – Curva tensão X potência de uma célula PV de Si monocristalino



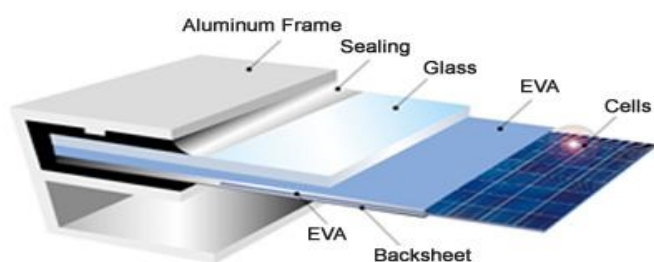
Fonte: GTES, P.47, 2004.

$$P_{m\acute{a}x} = I_{sc}V_{oc}FF \quad (4)$$

O FF é um indicativo de quanto à curva tensão versus corrente se aproxima de um retângulo, sendo superior a 0,7 para boas células (GTES, 2004; KALOGIROU, 2016).

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painel ou placa, são um conjunto de células PV conectadas eletricamente, em série e em paralelo a fim de aumentar a tensão e a corrente, respectivamente (BRAGA, 2008). Geralmente são montadas sobre estruturas rígidas recobertas com vidro para proteger as células (VILLALVA, 2012). Uma estrutura básica de um módulo fotovoltaico está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Partes típicas de um módulo PV



Fonte: RITEK green, 2017.

As curvas de tensão, corrente e potência dos módulos PV são semelhantes às das células solares, que serão apresentadas no próximo item.

### 2.3.2.3 Tecnologias PV

As células solares podem ser classificadas em três gerações. A primeira geração contempla as células de Si mono (m-Si) e policristalino (p-Si), enquanto a segunda geração são os filmes finos, Si amorfo, telureto de cádmio (CdTe) cobre-índio-gálio-selênio (CIGS). As mais recentes tecnologias de filmes finos e células orgânicas, são classificadas como de terceira geração. Apesar de apresentarem baixa eficiência e ainda não serem produzidas em escala comercial, existe muita pesquisa em torno destas tecnologias, a fim de obter-se células de alta eficiência e baixo custo (BAGHER; VAHID; MOHSEN, 2015). A seguir são apresentadas as principais características das tecnologias típicas empregadas na confecção de células fotovoltaicas, bem como, das tecnologias emergentes.

*Silício monocristalino:* as células de Si monocristalino são fabricadas a partir de *wafers* ou bolachas de Si puro, as quais são submetidas a processos químicos para receberem impurezas em ambas as faces, constituindo-se assim as camadas de Si *p* e *n*. Estas células alcançam uma eficiência de 15 a 18%, sendo as mais eficientes produzidas em larga escala (VILLALVA, 2012).

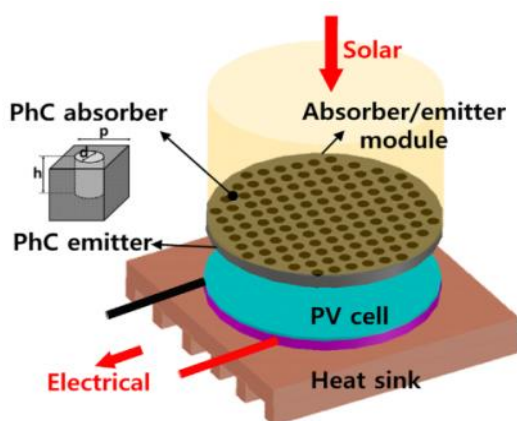
*Silício multicristalino - policristalino:* o processo de fabricação é muito semelhante as monocristalinas, porém, mais simples e com menor rigor no processo de controle, resultando em um custo final menor (SANTOS, 2013). Em nível comercial atingem eficiência entre 13 e 15%, as quais também devem ser montadas em módulos a fim de adquirirem resistência mecânica (VILLALVA, 2012).

*Filmes finos:* apresentam processo de fabricação mais barato por utilizarem menos energia na fabricação e menos matéria prima, além de terem o tamanho da célula ou painel limitado apenas pelo tamanho da base, contribuindo para diminuir o

efeito do sombreamento. Sofrem menos influência da temperatura, ou seja, menor redução na produção de energia com o aumento da temperatura quando comparada às policristalinas e monocristalinas (VILLALVA, 2012). Dentre os materiais empregados em filmes finos, destacam-se as células de Si amorfo (a-Si), CdTe e cobre-índio-gálio (KALOGIROU, 2016), e disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS).

*Termo Fotovoltaicos:* em sistemas termo fotovoltaicos existe um coletor térmico acoplado sobre a célula fotovoltaica que tem a função de absorver radiação solar e emitir para a célula PV fótons com comprimento de onda adaptados para a geração da célula fotovoltaica (FIGURA 7) (NAM *et al*, 2014).

Figura 7 - Esquema de um TPV



Fonte: NAM *et al*, p. 2, 2014.

*Orgânicas e poliméricas:* uma das tecnologias emergentes, construídas a partir de polímeros conjugados e outros materiais, apresentando uma eficiência em torno de 5% (CANESTRARO, 2010).

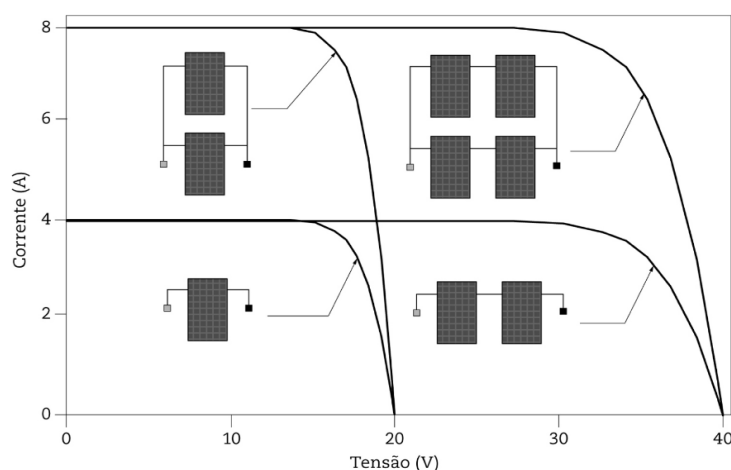
*Nano-PV:* são consideradas células solares de terceira geração, compostas por nanomateriais condutivos, poliméricos, flexíveis e imprimíveis (KALOGIROU, 2016).

### 2.3.2.4 Configurações de usinas

Em sistemas fotovoltaicos, a interligação de módulos em paralelo visa a obtenção de maiores correntes de saída, enquanto que na associação em série, obtém-se maiores níveis de tensão, mesmo princípio utilizado na interligação das células dentro dos módulos (BRAGA, 2008). A curva de tensão e corrente das conexões série e paralelo são ilustradas na Figura 8.

Observa-se que a tensão na associação paralelo é constante enquanto a corrente é a soma da corrente de cada célula. Já na ligação série a corrente é constante e a tensão é a soma da tensão de cada célula.

Figura 8 - Associação de células PV em série e paralelo



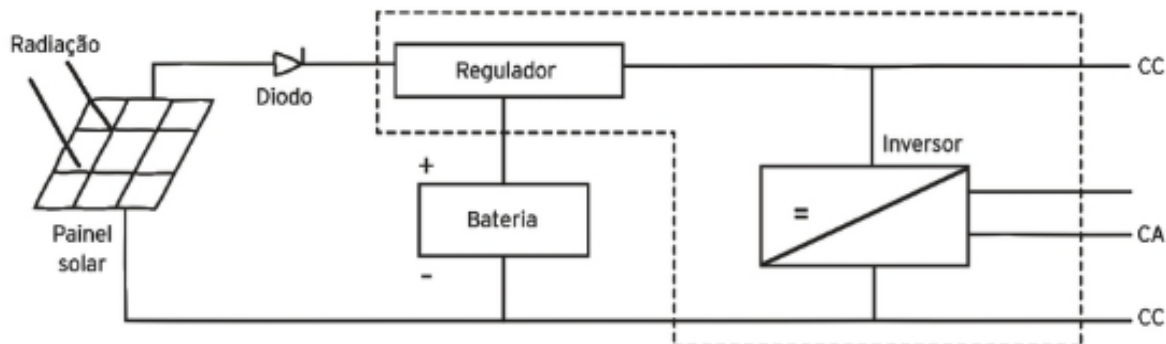
Fonte: Ziles, p. 34, 2012.

Esta interligação dos módulos PV é utilizada a fim de obter-se a quantidade de energia elétrica desejada, tanto para sistemas autônomos como para os conectados à rede. A configuração de sistemas autônomos é utilizada em locais remotos, para eletrificação rural e em estações metrológicas, enquanto sistemas interligados vêm sendo muito utilizados em GD ou usinas PV (VILLALVA, 2012; ZILES, 2012).

Os componentes básicos deste sistema são um conjunto de painéis fotovoltaicos, controlador de carga, baterias ou banco de baterias e inversor

Corrente Contínua / Corrente Alternada (CC/CA) (REIS, 2011). Na Figura 9 está representado através de um diagrama de blocos as conexões nesta configuração.

Figura 9 - Diagrama de sistema fotovoltaico autônomo



Fonte: Adaptado de Reis, 2011 p. 216.

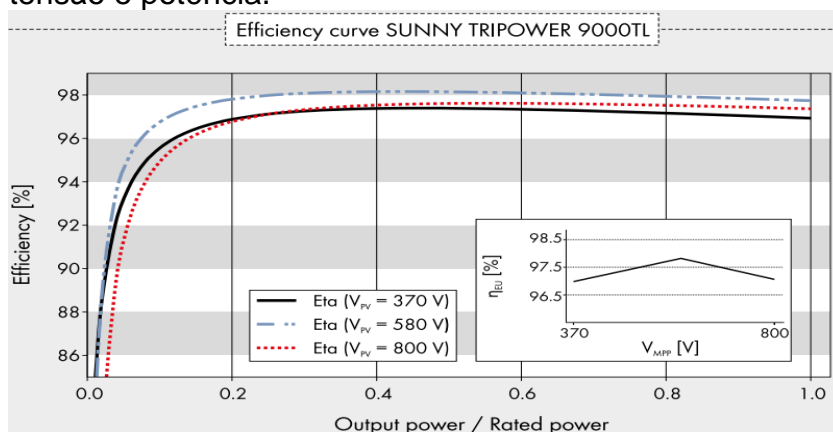
A corrente CC proveniente dos módulos PV é controlada e armazenada nas baterias ou consumida instantaneamente, seja na forma CC ou CA, a partir do inversor (PINHO; GALDINO, 2014). Aspectos referentes a sistemas autônomos não serão explanados, pois não é o foco deste trabalho.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), base da GD devido a facilidade de instalação e operação, são classificados de acordo com a potência instalada em microgeração, minigeração ou usina de eletricidade (VILLALVA, 2012). Os SFCR são compostos basicamente, por um conjunto de módulos PV, *array* ou *string*, e de um inversor CC/CA utilizado para converter a corrente contínua dos módulos em corrente alternada (MOLINA; ROMANELLI, 2015).

Os inversores são circuitos estáticos que, além de transformar a corrente CC em CA, têm a função de garantir o sincronismo com a tensão e frequência da rede e realizar o seguimento do ponto de máxima potência do sistema (ZILES, 2012). Na Figura 10, apresenta-se a curva de eficiência típica de um inversor, onde observa-se que a eficiência é influenciada pela variação da potência de saída,  $\text{Output power} / \text{Rated power} = \text{potência de saída} / \text{potência nominal}$ , e a tensão CC do conjunto de módulos,  $E_{ta}$ . O inversor em questão é um de 9 kW da SMA.



Figura 10 - Curva típica de eficiência de inversores fotovoltaicos em função da tensão e potência.



Fonte: SMA TRIPOWER, p. 3, 2017.

No Brasil os SFCR devem atender os pré-requisitos determinados pelo PRODIST, conforme apresentados na Tabela 1. No que diz respeito aos inversores, destacam-se o elemento de interrupção automático, proteção de sub e sobrefrequência que são os elementos de proteção indispensáveis para qualquer potência instalada (PRODIST, 2017).

Tabela 1 - Pré requisitos para conexão de SFCR

Equipamento	Potência Instalada		
	$P \geq 75 \text{ Kw}$	$75 \text{ kW} \leq P \leq 500 \text{ kW}$	$500 \text{ kW} \leq P \leq 5 \text{ MW}$
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Não	Sim
Proteção contra desbalanceamento de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Sim	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

Fonte: adaptado de PRODIST, 2017.

### 2.3.2.5 Perdas em sistemas fotovoltaicos

De acordo com a Lei da Conservação de Energia, o fluxo energético em um sistema em um determinado período de tempo é constante. A Primeira Lei da Termodinâmica, diz respeito ao desempenho ou eficiência do sistema energético, e possibilita o cálculo de perdas e do fluxo de energia em determinado sistema (EQUAÇÃO 5) (VIANA, et. al, 2012).

$$\Delta E_{entra} = \Delta E_{sai} + \Delta E_{sistema} \quad (5)$$

Em sistemas fotovoltaicos, as características elétricas dos módulos PV são afetadas principalmente pela irradiação solar e pela temperatura das células. Além disso, o espectro e ângulo de incidência da luz solar, sombreamento, a massa de ar (AM) e a sujeira sobre os módulos também interferem na geração PV (PINHO, GALDINO, 2014; ZILES, 2012).

A radiação proveniente do Sol, com comprimento de onda entre 0,15 e 3,0  $\mu\text{m}$ , ou seja, ultravioleta, visível e infravermelho, são as faixas de espectro fundamentais para aplicações de energia solar (KALOGIROU, 2016).

Além da variação da distância entre o Sol e a Terra, conforme explicado no item 2.3.1, a irradiação solar sofre atenuação da atmosfera devido a espessura da camada de ozônio, da distância percorrida através da atmosfera para chegar a determinado ponto, da quantidade de partículas de poeira e vapor d'água etc. e da extensão da cobertura das nuvens (KALOGIROU, 2016; TOLMASQUIM, 2016).

Parte da  $G_{SC}$  é refletida ou absorvida por moléculas suspensas na atmosfera, desta forma, a irradiação total, radiação global que chega a uma superfície plana terrestre, é a soma da radiação direta e difusa. Enquanto que, a radiação direta é composta pelas ondas eletromagnéticas que atingem a superfície em linha reta, a radiação difusa corresponde às ondas que chegam de maneira indireta ao plano, resultado da difração e reflexão das partículas suspensas no ar e de outros objetos

(VILLALVA, 2012). Para a aplicação em sistemas solares, a radiação global é a mais importante, sendo composta, em dias claros, por maior parcela de radiação direta e em dias nublados quase toda por radiação difusa (TOLMASQUIM, 2016).

Os fatores que causam a diminuição da irradiância são a reflexão atmosférica, absorção por moléculas atmosféricas como  $O_3$ ,  $CO_2$  e  $H_2O$ , dispersão molecular, *Dispersão de Rayleigh*, e dispersão pela poluição, *Dispersão de Mie*, conforme a Tabela 2, onde apresenta-se a redução da irradiância em função do ângulo de elevação solar ( $\gamma_s$ ) (PORTAL ENERGIA, 2004).

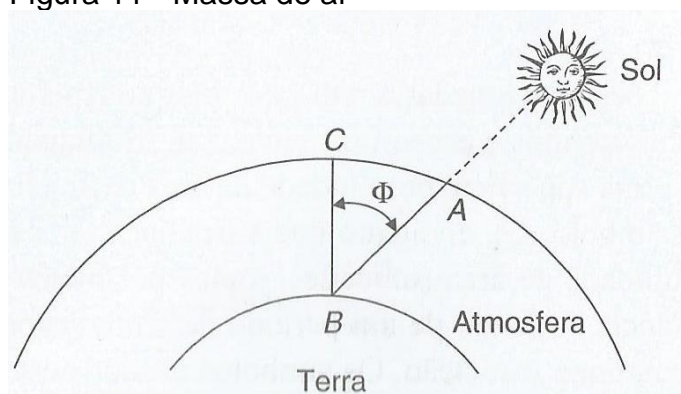
Tabela 2 - Redução da irradiância

$\gamma_s$	AM	Absorção	Dispersão de Rayleing	Difusão de Mie	Redução total
90°	1,00	8,7%	9,4%	0 ... 25,6%	17,3 ... 38,4%
60°	1,15	9,2%	10,5%	0,7 ... 29,5%	19,4 ... 42,8%
30°	2,00	11,2%	16,3%	4,1 ... 44,9%	28,8 ... 59,1%
10°	5,76	16,2%	31,9%	15,4 ... 74,3%	51,8 ... 85,4%
5°	11,50	19,5%	42,5%	24,6 ... 86,5%	65,1 ... 93,8%

Fonte: PORTAL ENERGIA, 2004.

Assume-se que a redução da intensidade da radiação solar é diretamente proporcional ao AM, a qual se modifica de acordo com o  $\gamma_s$ , considerando a atmosfera não estratificada, conforme observado na Figura 11 (KALOGIROU, 2016).

Figura 11 - Massa de ar

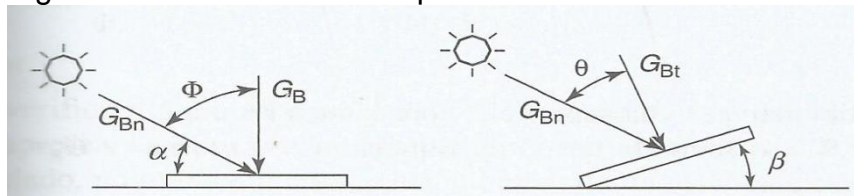


Fonte: KALOGIROU, p. 94, 2016

Devido a inclinação do Planeta Terra, utiliza-se de métodos de inclinação das superfícies coletoras de radiação a fim de aumentar o montante de energia absorvida (SANTOS, 2013). De acordo com a Figura 12, observa-se que a Irradiância direta normal ( $G_B$ ) pode ser calculada pela equação 6.  $G_{Bt}$ , que

corresponde a irradiação solar sobre uma superfície inclinada é calculada pela equação 7.

Figura 12 - Irradiância em superfície inclinada



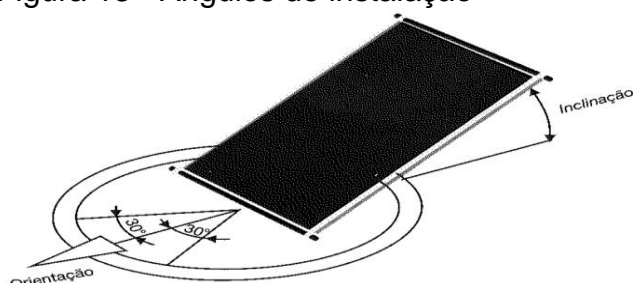
Fonte: KALOGIROU, p. 99, 2016.

$$G_B = G_{Bn} \cos(\Phi) \quad (6)$$

$$G_{Bt} = G_{Bn} \frac{\cos(\theta)}{\cos(\Phi)} \quad (7)$$

Em sistemas com inclinação e orientação fixa, os ângulos de inclinação do módulo e a orientação, também conhecido como azimutal de superfície, afetam a eficiência anual de geração de energia. Varia de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ , com  $0^\circ$  no sentido norte-sul,  $-180$  para Leste e  $180^\circ$  para Oeste, no Hemisfério Sul. A fim de maximizar a geração média anual, os módulos PV devem ser direcionados a Norte quando instalados no hemisfério Sul e orientados para o Sul quando instalados no hemisfério Norte, enquanto o ângulo de inclinação da superfície coincide com a latitude local (SANTOS, 2013). A representação dos ângulos ideais para a instalação de um módulo PV, estão representados na Figura 13.

Figura 13 - Ângulos de instalação

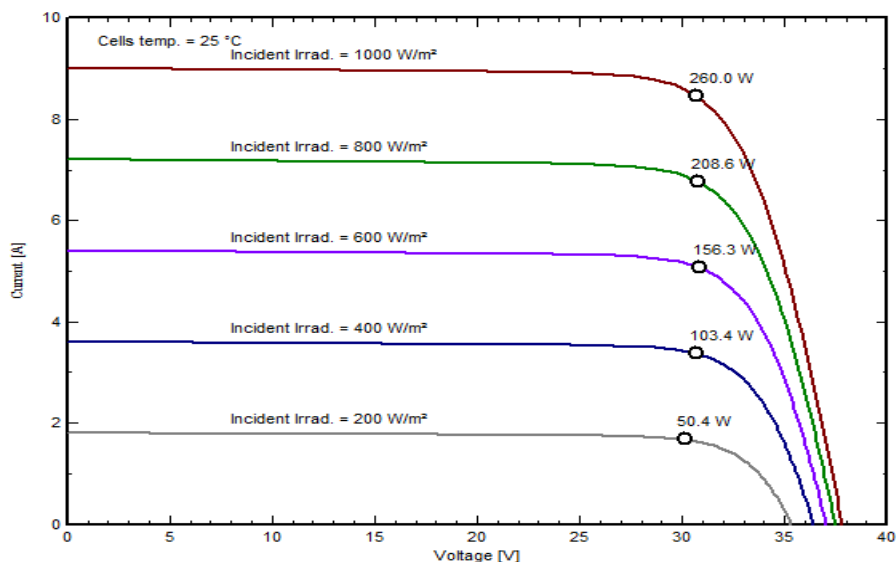


Fonte: Santos, p. 105, 2013.

A tensão e a corrente dos módulos variam de acordo com a inclinação do coletor PV, influenciados pelo montante de radiação absorvida. O comportamento da

tensão e corrente gerada por uma célula de Si policristalino, em função da variação da irradiância a uma temperatura fixa de 25°C, está apresentada na Figura 14.

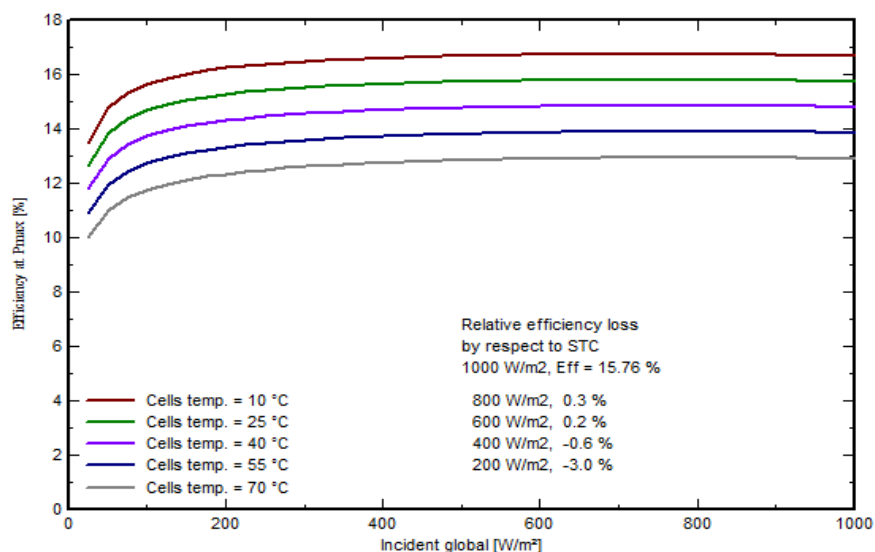
Figura 14 - Curva Tensão x Corrente em função da irradiância (REC 260PE BLK)



Fonte: PVsyst v.6.43.

Dependendo do local da instalação, em telhado ou no chão, os módulos PV estarão expostos a determinada temperatura que varia em função da irradiação, e trocas térmicas com o ambiente. De acordo com a Lei de Dissipação de Energia, sempre existe um montante de energia térmica como produto dos processos de conversão de energia (VIANA, et al., 2012). A variação da eficiência em função da radiação global para diversas temperaturas está representada na Figura 14.

Figura 15 - Variação da eficiência em função da radiação global (REC 260PE BLK).



Fonte - PVsyst v.6.43.

Em células PV, o excesso da energia de um fóton, montante superior a  $E_g$  capturado por um elétron, é dissipado para o material em forma de calor, processo denominado de termalização, contribuindo para o aumento da temperatura da célula solar (PINHO; GALDINO, 2014).

Entretanto, o aumento da temperatura do módulo PV proporciona um aumento da corrente de saída da célula (PINHO; GALDINO, 2014). Conforme apresentado na Figura 3, o modelo de uma célula solar é representado por uma fonte de corrente e um diodo em paralelo. De acordo com a Equação 8, observa-se a influência da temperatura absoluta ( $T_C$ ), na corrente do diodo ( $I_D$ ), e consequentemente na corrente fornecida pela célula.

$$I_D = I_o \left[ \exp\left(\frac{e \cdot ddp}{k \cdot T_C}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

Onde:

$T_C$  = temperatura absoluta (K)

$k$  = constante de Boltzmann dos gases

$e$  = carga eletrônica =  $1,602 \times 10^{-19}$  J/V

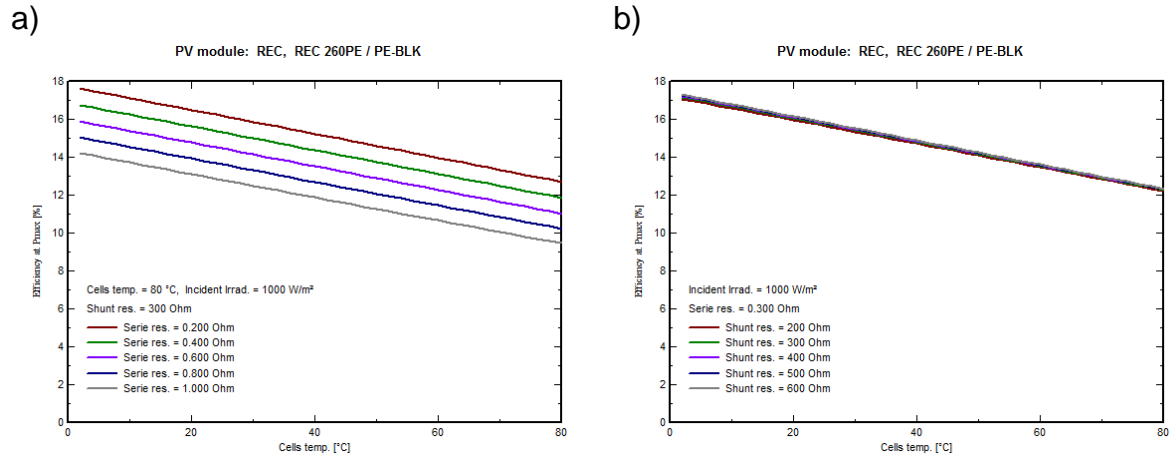
$ddp$  = tensão aplicada através da célula

$I_o$  = corrente de saturação reversa do diodo (A)

A variação da eficiência em função da temperatura para determinadas  $R_S$  e  $R_{SH}$ , são mostradas na Figura 16 a e b, respectivamente.

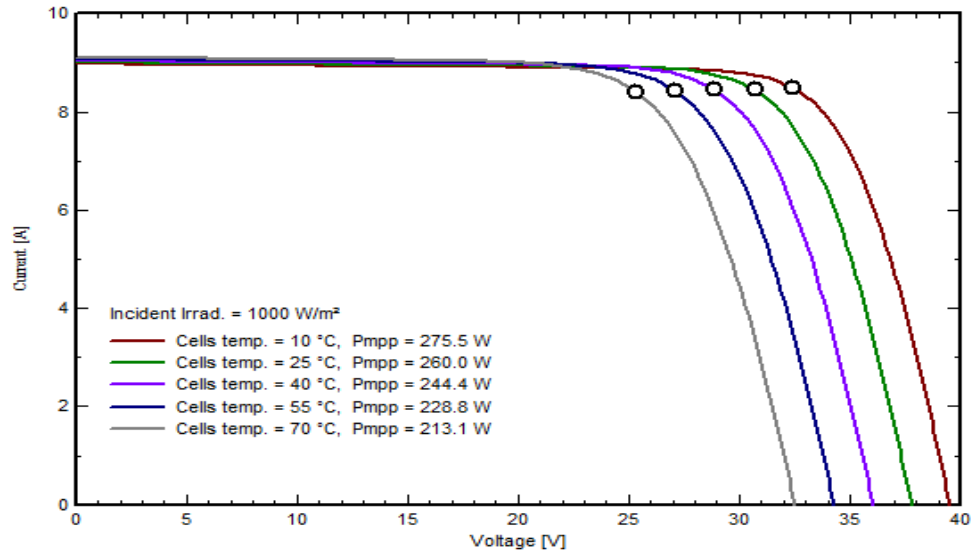
As curvas de tensão e corrente em função da temperatura de uma célula PV, exposta à irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$ , é apresentada na Figura 17. Desta forma, verifica-se que o aumento da temperatura acarreta em uma diminuição dos níveis de tensão de circuito aberto, que pode ser calculada de acordo com a Equação 9.

Figura 16 - a - Resistência série; b - Resistência interna.



Fonte: PVsyst v.6.43.

Figura 17 - Curvas de tensão e corrente em função da temperatura



Fonte: PVsyst v.6.43.

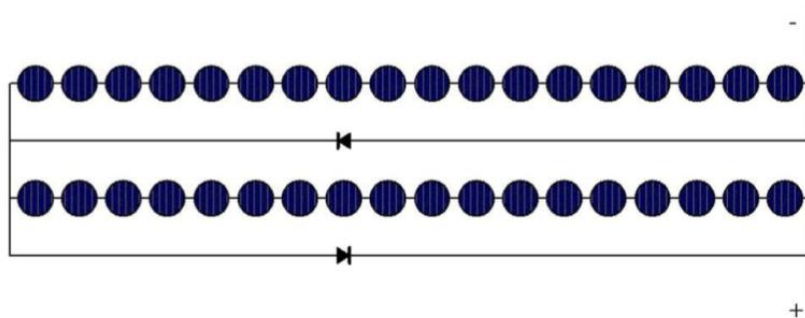
$$V_{oc} = \frac{kT_c}{e} \ln \left( \frac{kT_c}{I_o} + 1 \right) \quad (9)$$

Importante salientar que a corrente de saturação reversa sofre grande influência da temperatura (KALOGIROU, 2016).

O efeito do sombreamento é muito prejudicial a uma placa fotovoltaica, pelo fato das células estarem conectadas em série, quando uma delas recebe pouca ou nenhuma radiação ela deixa de conduzir, impedindo a passagem da corrente elétrica. Para diminuir o efeito do sombreamento, os fabricantes inserem diodos *bypass* a cada conjunto de células visando desviar parte da corrente quando este

conjunto não estiver conduzindo, Figura 18. Esse não é o método mais apropriado, entretanto, a partir disso, é possível diminuir as perdas ocasionadas pelo sombreamento (VILLALVA, 2012).

Figura 18 - Diodo de *bypass*



Fonte: Pinho e Galdino, p. 160, 2014.

No momento do projeto deve-se utilizar o diagrama da trajetória do Sol, Figura 19, para auxiliar na escolha do melhor local/modo de instalação.

O acúmulo de sujeira sobre os módulos PV prejudica a geração de energia, prejudicando o rendimento do sistema, devido a atenuação da irradiância, a transmissão espectral e a não homogeneidade da irradiância no módulo, causando efeito semelhante ao de sombreamento (HICKEL et al 2016).

A Tabela 3 apresenta a relação das tecnologias e dos seus desempenhos relativos em um período (PR) de dez dias antes da limpeza e dez dias após a limpeza.

Tabela 3 - Desempenho em função da sujeira em módulos PV

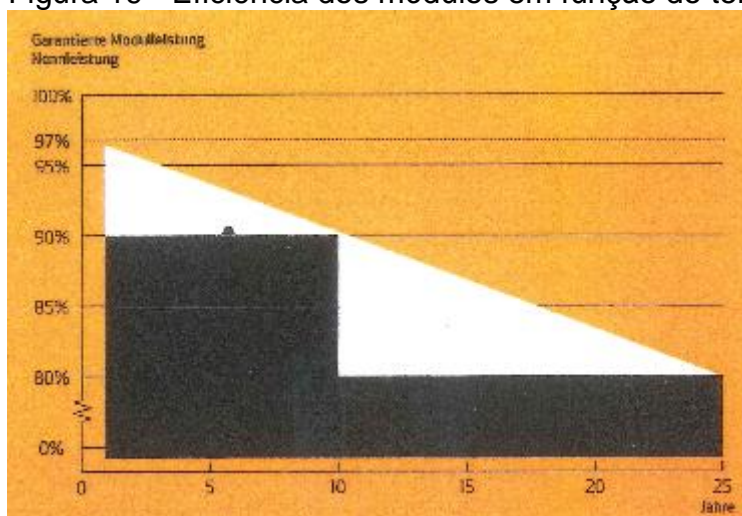
	uc-Si	a-Si	CIGS	m-Si	p-Si
<b>PR antes da limpeza</b>	80,00%	86,00%	80,00%	86,00%	81,00%
<b>PR após a limpeza</b>	84,00%	90,00%	82,00%	89,00%	89,00%
<b>Melhora no desempenho</b>	4,30%	4,30%	2,80%	2,60%	10,10%

Fonte: Adaptado de Hickel et al., 2016.

A eficiência dos módulos também é prejudicada pelo efeito da depreciação com o passar dos anos, conforme apresentado na Figura 19.



Figura 19 - Eficiência dos módulos em função do tempo.



Fonte - Manual módulos PV REC 260PE BLK.

Observa-se que há uma redução de 20% em 25 anos, cerca de 0,8% ao ano.

### **3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

#### **3.1 O sistema PV em estudo**

A usina em estudo está registrada na ANEEL como Minigeração Fotovoltaica, denominada Tecnovates com CNPJ 04 008 342 0001 09. Está conectada à rede de distribuição da RGE Sul através da unidade consumidora 55 789 03-0, localizada na Avenida Avelino Talini, número 1000, Bairro Universitário, Lajeado/RS. As coordenadas geográficas do sistema fotovoltaico são 29°26'56 56" Sul e 51° 56 37 42" Oeste (MEMORIAL DESCRITIVO, 2015).

O sistema de minigeração entrou em operação em maio de 2015, com potência instalada de 237,12 kWp, é composto por 912 módulos fotovoltaicos, REC260PE, distribuídos em cinco arranjos sobre os telhados dos prédios 19, 20 e 21 da Universidade do Vale do Taquari – Univates (ANEXO A), conforme as configurações apresentadas na Tabela 4 (MEMORIAL DESCRITIVO, 2015).

Por estarem instalados sobre o telhado dos prédios, e estes possuírem platibandas, parte dos módulos sofrem o efeito de sombreamento. Além disso, estão instalados em quatro orientações distintas e com inclinações diferentes, conforme a APÊNDICE A, formulado com base no ANEXO B, Google Earth e medidas em campo.

Tabela 4 - Dados dos arranjos

Arranjos	Nº de módulos	Área (m²)	Potência de Pico (kWp)
1	242	399,3	62,92*
2	242	399,3	62,92*
3	72	118,8	18,72*
4	128	211,2	33,28*
5	228	376,2	59,28*
Total	912	1504,81	237,12

Fonte: adaptado de MEMORIAL DESCRITIVO, 2015.

Cada arranjo conta com um determinado número de inversores SMA de diversas potências, de acordo com a Tabela 5, que apresenta a distribuição dos inversores, WRs, e suas características. Esta tabela traz a informação da quantidade de módulos conectados em cada inversor e o *over loss* de cada circuito, ou seja, a relação entre a potência instalada de módulos e a potência do respectivo inversor as quais estão conectadas. A alocação dos inversores, bem como, a representação das placas conectadas a cada inversor encontra-se no ANEXO B.

Tabela 5 - Especificações dos inversores

Inversor	Arranjo	Modelo	Potência (kW)	Nº Módulos	Over loss
WR1	1	SMA STP 15000TL	15	72	19,87%
WR2	1	SMA STP 15000TL	15	73	20,97%
WR3	1	SMA STP 15000TL	15	70	17,58%
WR4	1	SMA STP 6000TL	6	28	17,58%
WR5	2	SMA STP 15000TL	15	71	18,74%
WR6	2	SMA STP 15000TL	15	71	18,74%
WR7	2	SMA STP 15000TL	15	70	17,58%
WR8	2	SMA STP 6000TL	6	29	20,42%
WR9	3	SMA STP 7000TL	7	36	25,21%
WR10	3	SMA STP 7000TL	7	36	25,21%
WR11	4	SMA STP 15000TL	15	64	9,86%
WR12	4	SMA STP 15000TL	15	64	9,86%
WR13	5	SMA STP 15000TL	15	65	11,24%
WR14	5	SMA STP 15000TL	15	65	11,24%
WR15	5	SMA STP 10000TL	10	49	21,51%
WR16	5	SMA STP 10000TL	10	49	21,51%
Total	5		196	912	17,34%

Fonte: Adaptado de MEMORIAL DESCRITIVO, 2015.

Os modelos de inversores utilizados são munidos de proteções internas tais como, sincronizar o inversor na rede (25), subtensão (27), sobretensão (59), potência direcional (32), sobrecorrente direcional (67), sobrecorrente DC (76),

frequência (81), derivada de frequência (81 df/dte) e anti-ilhamento (78). Se alguma destas proteções identificarem alguma anomalia no circuito CC ou na rede CA, o inversor é desconectado imediatamente. Além disso, o sistema possui placas de sinalização em pontos de intervenção humana, tais como na Caixa de Medição (BT/MT) e Disjuntor Geral de MT.

A geração da usina é monitorada a partir de leituras mensais realizadas no início do mês, da geração de cada inversor em kWh, desde junho de 2017 a maio de 2018, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados de Geração Usina Tecnovates (junho 2017 a maio 2018).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
WR1	2.384	2.189	1.735	1.507	1.005	923	1.323	1.309	1.310	2.079	2.019	2.191	<b>19.974</b>
WR2	2.374	2.152	1.705	1.509	1.002	929	1.332	1.266	1.272	2.075	1.978	2.176	<b>19.770</b>
WR3	2.042	1.874	1.508	1.396	949	921	1.284	1.200	1.128	1.810	1.665	1.835	<b>17.612</b>
WR4	893	813	636	562	376	364	515	486	478	775	748	811	<b>7.457</b>
WR5	2.249	2.070	1.663	1.467	987	917	1.332	1.266	1.253	1.986	1.912	2.082	<b>19.184</b>
WR6	2.195	2.043	1.611	1.448	968	891	1.287	1.246	1.233	1.959	1.903	2.055	<b>18.839</b>
WR7	2.283	2.097	1.666	1.494	996	961	1.364	1.275	1.248	2.006	1.918	2.048	<b>19.356</b>
WR8	953	882	699	626	416	402	580	576	485	840	817	880	<b>8.156</b>
WR9	1.150	1.065	806	552	361	311	432	479	542	1.009	988	1.075	<b>8.770</b>
WR10	1.227	1.137	884	662	467	385	544	576	620	1.092	1.060	1.141	<b>9.795</b>
WR11	2.218	1.903	1.533	1.300	866	804	1.141	1.119	1.129	1.871	1.801	1.983	<b>17.668</b>
WR12	2.079	1.861	1.456	1.253	829	777	1.091	1.069	1.079	1.802	1.734	1.896	<b>16.926</b>
WR13	2.266	2.031	1.568	1.337	860	760	1.093	1.123	1.182	1.967	1.932	2.097	<b>18.216</b>
WR14	2.185	2.006	1.578	1.379	909	818	1.185	1.169	1.180	1.932	1.875	2.019	<b>18.235</b>
WR15	1.515	1.398	1.093	968	661	619	883	834	825	1.337	1.298	1.406	<b>12.837</b>
WR16	1.426	1.344	1.043	913	628	587	845	789	770	1.268	1.229	1.329	<b>12.171</b>
<b>Total</b>	<b>29.439</b>	<b>26.865</b>	<b>21.184</b>	<b>18.373</b>	<b>12.280</b>	<b>11.369</b>	<b>16.231</b>	<b>15.782</b>	<b>15.734</b>	<b>25.808</b>	<b>24.877</b>	<b>27.024</b>	<b>2.449.666</b>

Fonte: Do autor, 2017.

A usina entrou em operação em meados de maio de 2015, de tal forma que até setembro de 2016 tem-se apenas o valor total de energia gerada neste período e não mensal.

### 3.2 Métodos

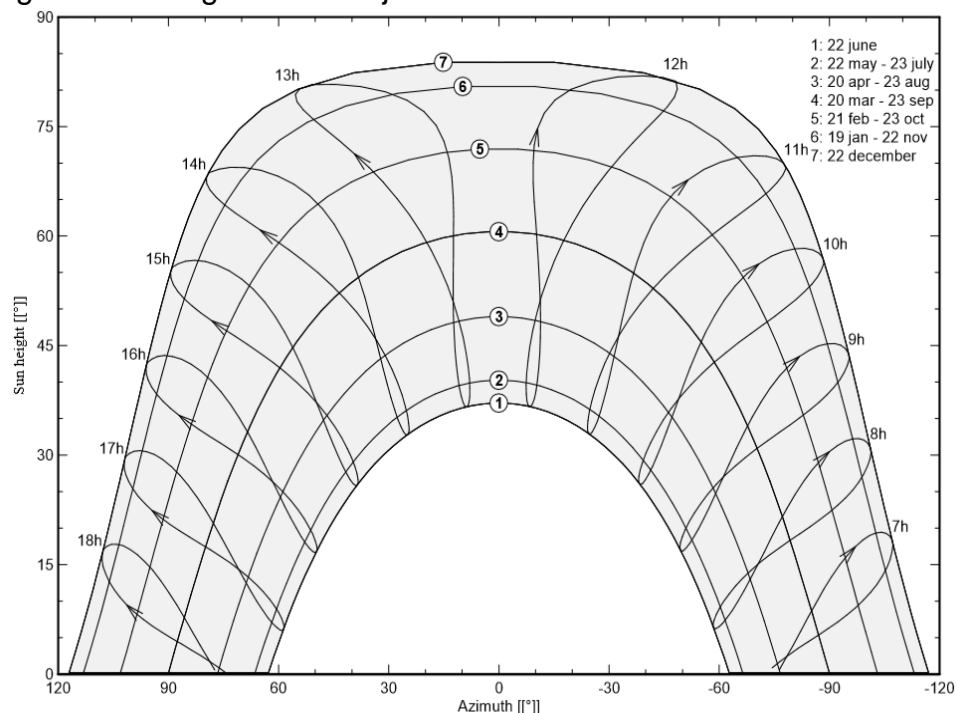
As simulações das configurações apresentadas no decorrer deste trabalho, foram realizadas utilizando uma versão *free* do *software* PVsyst 6.72, desenvolvido na Suíça. De acordo com o site da empresa, o *software* possibilita ao usuário analisar com precisão diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos, identificando a melhor solução (PVSYT, 2018).

Visto que a eficiência dos módulos sofre grande influência da temperatura e da radiação, faz-se necessário informar ao PVsyst dados de temperatura e radiação média mensal, juntamente com informações da velocidade média mensal do vento. Utilizou-se, para este fim, dados fornecidos pelo Núcleo de Informações Hidrometeorológicas - Univates (NIH), localizado a 29°26'40.96" S e 51°57'28.91" O, em conjunto com dados adquiridos da estação automática, Estação Teutônia-A882 localizada a 29°45'03.34" S e 51°82'42.83" O, altitude de 80 metros, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), período de 01 de junho de 2017 a 31 de maio de 2018. A média da temperatura e velocidade do vento utilizada foram as do NIH, enquanto que os dados de radiação global utilizados foram apenas os da Estação Teutônia-A882, pois o NIH monitora apenas a radiação direta. O APÊNDICE C traz os dados utilizados.

Além destes dados, foram realizadas simulações com médias informadas por NASA-SSE (1983 a 2005) e Meteonorm (2006 a 2012), carregadas diretamente pelo *software*. Os valores utilizados estão apresentados no APÊNDICE D.

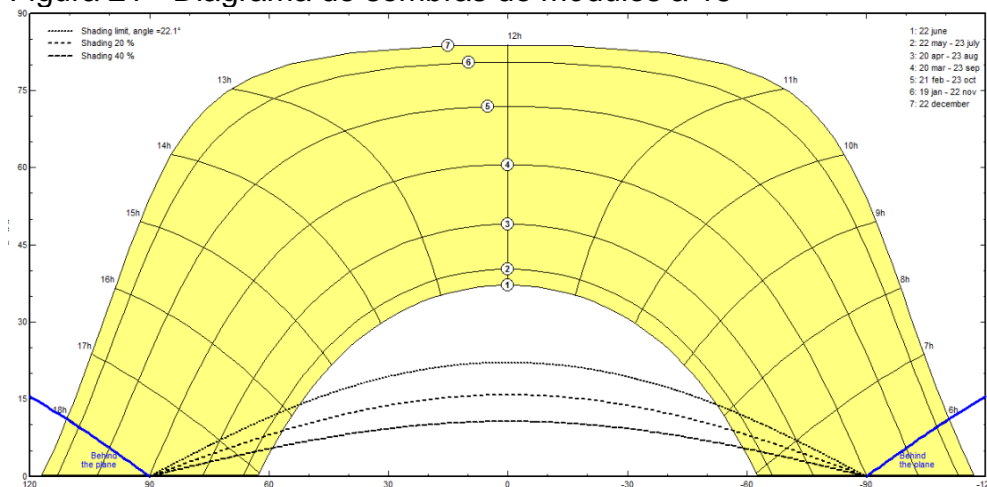
O sistema proposto também sofrerá com o efeito da sombra, pois, será composto por várias fileiras de módulos dispostas uma a frente da outra. Em determinados dias do ano a sombra oriunda da fileira da frente será maior, afetando a geração da fileira posterior. A Figura 20 apresenta o diagrama de da trajetória do sol, para as coordenadas geográficas da usina Tecnovates.

Figura 20 - Diagrama da trajetória do Sol



Fonte: Do autor, 2018 (Gerado através do software PVsyst, versão 6.43)

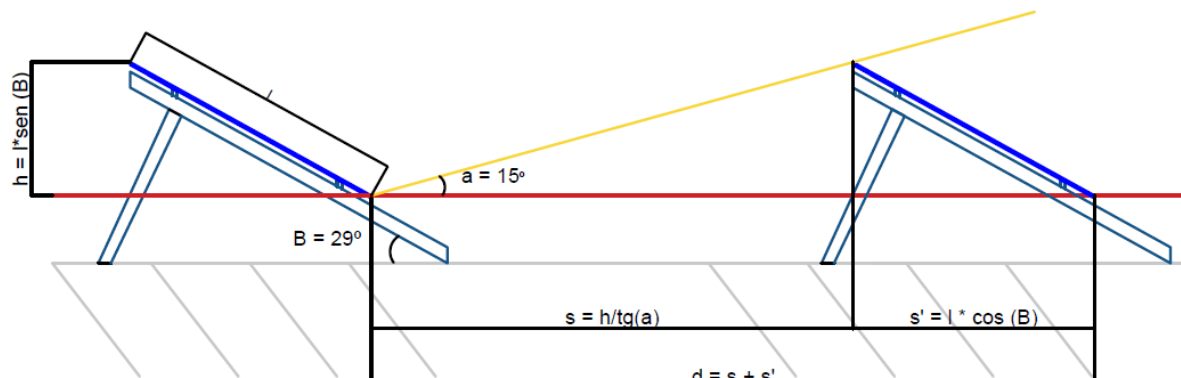
Neste estudo optou-se em utilizar a altura do sol de  $15^\circ$ , ou seja, entre o dia 22 de maio e 23 de julho, onde às fileiras ficarão sombreadas até 8:20 h e depois das 15:40 h, aproximadamente. A melhor situação de Sol se dá 22 de dezembro, onde os módulos sofrem efeito de sombreamento apenas antes das 7 h e depois das 18 h, aproximadamente (FIGURA 21).

Figura 21 - Diagrama de sombras de módulos a  $15^\circ$ 

Fonte: Do autor, 2018 (Gerado através do software PVsyst, versão 6.43)

A partir destas informações é possível calcular a distância mínima das fileiras por trigonometria, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Cálculo de ângulos distanciamento de módulos PV.



Fonte: adaptado de ULHI, 2017.

**Simulação 1:** utilizando o *software*, foram realizadas diversas simulações. Primeiramente de um sistema fotovoltaico composto por 912 módulos PVs REC260PE, com ângulo azimutal de superfície de  $0^\circ$  e o ângulo de inclinação dos módulos de  $29^\circ$ , conforme a localização latitudinal da instalação, 18 inversores SMA, 16 idênticos aos utilizados na usina real e acrescentou-se 2 inversores SMA de 15 kW, a fim de diminuir o *over loss* (TABELA 5). O projeto proposto é de uma instalação em solo, com os módulos distribuídos em sete fileiras de 74,5 metros de comprimento e 3,10 metros de largura, sustentando 134 módulos em cada (APÊNDICE B), fixados a uma estrutura metálica apropriada, distanciadas 8,9 m, distância  $d$ , Figura 21, ocupando uma área de aproximadamente 4247 m<sup>2</sup>.

A distribuição hipotética dos módulos em cada inversor, apresentada na Tabela 7, é realizada de tal forma a manter o *over loss* médio próximo a 4,69%, com exceção do WR11 e WR12, onde foram conectados 4 módulos a mais em cada um, por questões de viabilidade técnica do *software*, a fim de manter a totalidade de 912 painéis. Realizou-se simulações com os dados do NIH em conjunto com os dados do INMET, com as médias mensais do último ano (junho de 2017 a maio de 2018), e uma utilizando a média das condições climáticas entre 06 e 19 de maio de 2018, uma simulação com os dados de NASA-SSE (1983 a 2005), e outra com dados de Meteonorm (2005 a 2012), os dois últimos carregados diretamente pelo *software*.

Tabela 7 - Distribuição de módulos e inversores - Sistema proposto

Inversor	Modelo	Potência Inv. (kW)	Nº Módulos	Over loss
WR1	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR2	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR3	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR4	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR5	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR6	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR7	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR8	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR9	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR10	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR11	SMA STP 10000TL	10	44	12,59%
WR12	SMA STP 10000TL	10	44	12,59%
WR13	SMA STP 7000TL	7	28	3,85%
WR14	SMA STP 7000TL	7	28	3,85%
WR15	SMA STP 6000TL	6	24	3,85%
WR16	SMA STP 6000TL	6	24	3,85%
WR17*	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
WR18*	SMA STP 15000TL	15	60	3,85%
Total		226	912	4,69%

Fonte: Do autor, 2018.

Com a obtenção dos resultados da simulação, realizou-se uma análise econômica de quatro cenários possíveis: **cenário 1** – condições atuais, usina instalada no telhado e conectada ao sistema de compensação do mercado livre; **cenário 2** – usina instalada nas condições atuais e conectada ao sistema de compensação do mercado cativo de energia; **cenário 3** – usina instalada no solo, nas configurações ideais descritas acima, conectada ao sistema de compensação de mercado livre; **cenário 4** – usina instalada no solo, nas configurações ideais, conectada ao sistema de compensação do mercado cativo.

Para os cálculos econômicos considerou-se a taxa de inflação igual a 6% ao ano, o custo de energia para o mercado livre de R\$ 0,52830 por kWh e para o mercado cativo de R\$ 0,69917 por kWh.

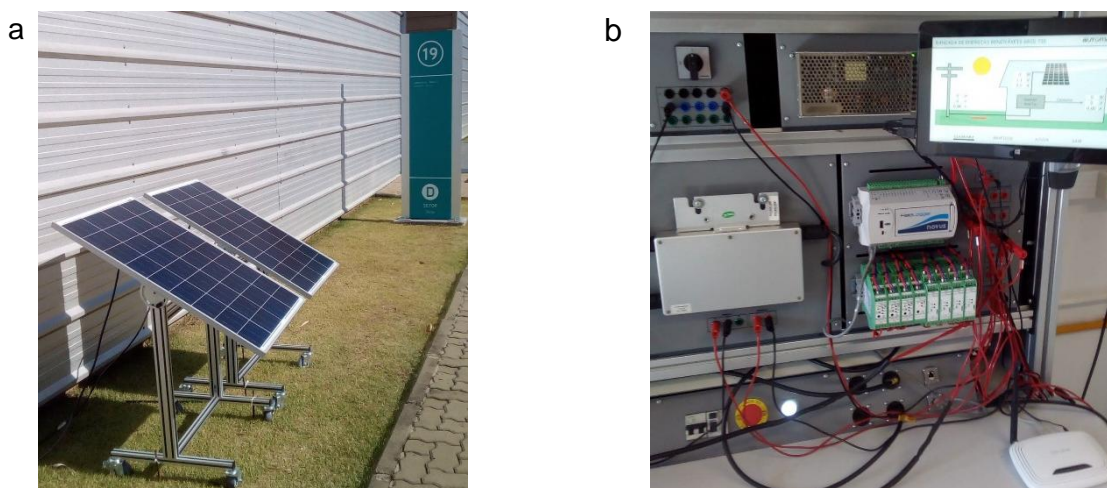
**Simulação 2:** a fim de avaliar as perdas de geração da usina real, em função das temperaturas mais elevadas de operação dos módulos, devido dificuldade da passagem de ar sob os painéis e consequente a não ocorrência da troca térmica, pelo efeito do sombreamento e acúmulo de sujeita sobre os painéis, realizou-se



outra simulação, utilizando as médias de temperatura, radiação e velocidade do vento, no intervalo entre 06 e 19 de maio. Separou-se a usina em 10 áreas, representadas no APENDICE A, onde cada área possui uma inclinação e orientação diferentes, conforme indicadas na Tabela 12. As áreas 9 e 10 possuem as mesmas características que as áreas 1 e 2, porém são sombreadas durante o período da manhã pelo prédio onde estão as áreas 7 e 8. Nesta simulação utilizou-se um sistema com 60 módulos REC 260PE BLK e um inversor de SMA de 15 kW, onde simulando-se cada área, considerando a fixação sobre uma superfície inclinada, telhado sem platibandas, com orientação e inclinação idêntica a real, desconsiderando o efeito do sombreamento. Os resultados das simulações e comparações são apresentados no Capítulo 4.

Para a validação dos resultados das simulações, foram instalados dois módulos fotovoltaicos Yingli Solar YL95P-17b 2/3, de 95 W cada, em paralelo, com ângulo azimutal de superfície de  $0^{\circ}$  e de inclinação igual a  $29^{\circ}$ . Estes módulos foram instalados próximo ao local da Usina real, conforme Figura 23 a, conectados a banca de medição, Figura 23 b. A medição da geração foi realizada por uma bancada de teste munida de transdutores de corrente DC MCR-S-1/5-UI-SW-DCI, e de tensão DC, MRC-UDC-UI-B-DC. Os dados lidos, entre 06 e 19 de maio de 2018, foram armazenados num Fieldlogger Novus, e posteriormente coletados para análise. Não foi realizado procedimento de aferição/calibração da bancada de medição.

Figura 23 – Protótipo teste: a) módulos; b) bancada de medição



Fonte: Do autor, 2018.

## 4. RESULTADOS

Os resultados do protótipo instalado para medição da geração das duas placas instaladas de forma ideal, os dados resultantes da simulação de um sistema ideal descrito no item 3.2, geração da usina para o período de 06 a 19 de maio de 2018, geração diária em kWh/dia, quantidade de módulos e potência em cada situação, relação entre a potência gerada e a potência instalada por ano, tendo por unidade de medida kWh/kWp/ano, estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de simulação, protótipo teste e usina real entre 06 e 19 de maio de 2018.

DADOS DE 05 A 19 DE MAIO DE 2018 E-Array						
	Geração (kWh)	Geração dia (kWh/dia)	Quant. de módulos	Potência módulo (W)	Pot. Gerada/ Pot. instalada	kWh/kWp/ ano
Geração usina real 05-19 de maio	6.744,02	481,72	912	260	0,002	731
Geração protótipo	9,78	0,7	2	95	0,0037	1.323
Geração usina simulada (com médias de condições climáticas de 05-19)	9.624,02	687,43	912	260	0,0029	1.044

Fonte: Do autor, 2018.

Os dados da tabela acima são referentes à energia gerada pelos módulos, *E-Array*, não a injetada na rede, *E-Grid*. Visto que o inversor da usina informa apenas a *E-Grid*, estimou-se, com o auxílio do *software*, as perdas presentes na usina real, em função dos itens descritos na Tabela 9, somando-se este valor a geração *E-Grid* na geração simulada e real. Este procedimento não foi utilizado na geração do protótipo, pois a medição foi realizada antes da conexão com o inversor, lado CC.

Tabela 9 – Análise de perdas

Descrição	Simulado	Real
E-Grid (kW)	19.234,00	6.096,51
Degradação induzida pela luz (1,5%)	1,50	1,50
Incompatibilidade de módulos e strings (%)	1,10	1,10
Perdas ohmicas nos cabos (%)	1,00	1,00
Degradação dos módulos (20% em 25 anos) - 3 anos		2,40
Loss due to irradiance level (%)	0,70	0,70
Perdas nos inversores	2,00	3,00
Por temp. (%) (aproximadamente)	0,92	0,92
Total de perdas	7,22	10,62
Desconsiderando as perdas nos inversores (kW)	20.622,90	6.744,02

Fonte: Do autor, 2018.

Conforme observa-se na Tabela 8 a média de energia gerada em função da potência instalada por ano, para o período em análise ficou em torno de 731 kW/kWp/ano na usina real e 1044 kW/kWp/ano para o sistema ideal proposto neste estudo, utilizando-se os dados climáticos de INMET e NIH, enquanto que a geração do protótipo foi de 1323 kW/kWp/ano. Acredita-se que o baixo rendimento da usina real esteja relacionado as perdas em função de sombreamento. A maior eficiência do protótipo em relação a simulação, pode estar condicionada a calibração da bancada de medição e, conforme observado na Figura 22 a, há uma parede metálica próxima aos módulos teste, que pode ter direcionado mais radiação difusa aos módulos.

Os resultados da **simulação 1**, descrita no item 3.2, e a geração anual da usina real entre junho de 2017 e maio de 2018, bem como a média total anual desde a entrada em operação da usina, e os dados de radiação média, temperatura e perdas por temperatura (informada pelo *software*) estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados de simulação 1 e dados de geração usina real

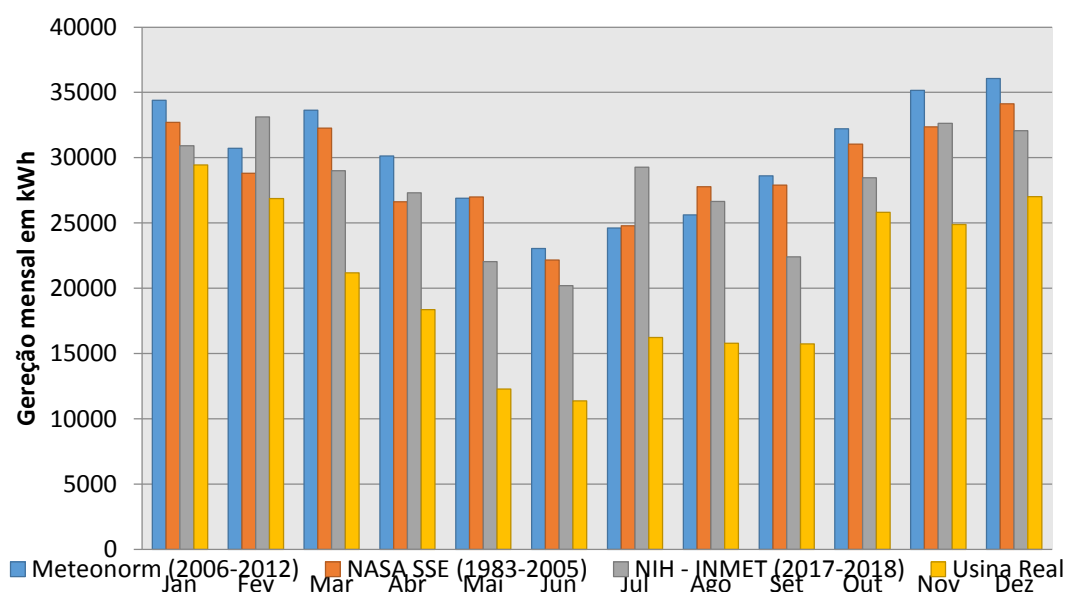
	Ger. Ano (MW)	Rad. Média W/m². mês	Temp. Med. °C/ mês	Perd. Temp. (%)	kWh/kWp/ ano
Dados de junho de 2017 a maio de 2018 (NIH Univates e INMET Teutônia)	334,1	183,4	21,36	-9,28	1.415
Dados do site Meteonorm de (2006 a 2012)	361,1	194,8	21,4	-9,60	1.505
Dados do site NASA-SEE de (1983 a 2005)	347,56	182,6	19,3	-8,36	1.442
Geração real de junho de 2017 a maio de 2018	244,97	183,4	21,36	---	1.030
Geração real de maio de 2016 a maio de 2018 (média por ano)	243,27	---	---	---	1.026

Fonte: do autor, 2018.

Na Tabela 10 apresenta-se os resultados das simulações em determinadas condições climáticas. Utilizou-se dados climáticos Meteonorm (2006 a 2012) e NASA SSE (1083 a 2005), assumindo-se que as condições climáticas são equivalentes para períodos maiores. Entretanto, os dados NASA SSE foram coletados via satélite, não contendo informação sobre velocidade do vento que interferem na temperatura de operação dos painéis. A partir das simulações constatou-se que a relação entre a energia gerada pela potência instalada por ano variou cerca de 90 kWh/kWp/ano nas três simulações da usina ideal (INMET+NIH – 1415; Meteonorm – 1505; NASA SSE – 1442), porém esta relação foi muito superior a relação da usina real, 1030 kWh/kWp/ano, junho de 2017 a maio de 2018 e, 1026 kWh/kWp/ano em média de maio 2016 a abril 2018.

O Gráfico 1 apresenta os resultados da geração mensal média para as simulações com dados climáticos das 3 fontes, mais a geração real do último ano.

Gráfico 1 - Geração média mensal simulada e real em kWh



Fonte: Do autor, 2018.

Diante destes valores, torna-se possível realizar a análise para os 4 cenários descritos anteriormente. Para o cenário 1 e 2, calculou-se o valor de geração para o ano zero, considerando o valor acumulado gerado entre maio de 2015 a abril de 2018, sendo a geração no primeiro ano de 100% e aplicando uma taxa de redução de 0,8% ao ano, obteve-se o valor estimado de geração para o período. A partir disto, aplicou-se a taxa de redução para os 25 anos seguintes. Para o cenário 3 e 4

a geração de energia no primeiro ano foi obtida a partir da simulação do sistema ideal.

Posteriormente, aplicando um valor médio de R\$ 0,52830/kWh, que representa o custo da energia elétrica para a Univates no ano de 2017 na modalidade mercado livre, e R\$ 0,69917/kWh para o mercado cativo, consumidor A4 (ANEEL, 2018), com uma taxa de inflação de 0,06 ao ano, obteve-se os seguintes resultados, Tabela 11.

Tabela 11 - Perspectivas em diferentes cenários

	Valor presente (R\$)	Diferença para o cenário 1 (R\$)	Custo adicional (R\$)	Lucro (R\$)
<b>Cenário 1</b>	2.643.455,84			
<b>Cenário 2</b>	3.498.230,64	854.774,80		
<b>Cenário 3</b>	3.746.859,86	1.103.404,02	337.500,00	765.904,02
<b>Cenário 4</b>	4.958.425,92	2.314.970,09	337.500,00	1.977.470,09

Fonte: Do autor, 2018.

O custo adicional na época da instalação envolve a compra de mais dois inversores de 15 kW, R\$ 30.000,00, custo de estruturas para fixação das placas no solo, R\$ 260.000,00 – orçamento realizado por empresa do ramo, e custos gerais relacionados as sapatas de concreto e demais componentes necessários para a instalação, R\$ 47.500,00.

A Tabela 11 apresenta os valores calculados para uma estimativa de 25 anos a partir da instalação da usina real. Neste cenário, admitindo-se um custo adicional na instalação do sistema de 337,5 mil reais, para a instalação no chão, observa-se a rentabilidade nos quatro cenários, sendo mais atraente o cenário 4. Importante salientar que os cálculos são uma estimativa, admitindo-se que as condições climáticas não fujam da curva padrão, considerando a inflação anual fixa em 6% ao ano e o custo da energia atual. Além disso, admite-se que a diferença entre a geração do protótipo e a geração simulada com os dados NIH e INMET possa ter sido influenciada por diversos fatores, entre eles destaca-se a parede reflexiva próxima às placas, a calibração dos sensores de radiação dos laboratórios e sua localização, além da calibração dos medidores de energia.

Visando verificar as perdas na geração de energia da usina real, realizou-se a **simulação 2**, descrita no item 3.2, obtendo-se os resultados da Tabela 12.

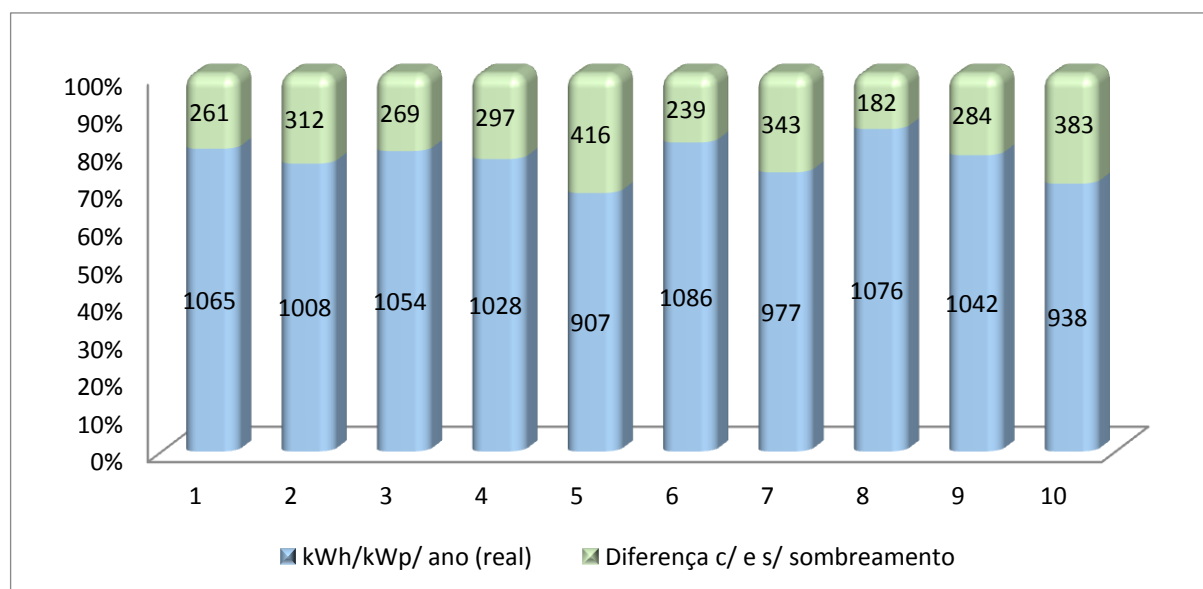
Tabela 12 - Perdas na geração em função de temperatura, sombreamento e acúmulo de sujeira.

ÁREA	Inclinação	Orientação	kWh/kWp/ ano (real) - jun 17 a mai 18	kWh/kWp/ ano (simulado) - dados de jun 17 a mai 18	Diferença c/ e s/ sombreamento	Energia Anual (MW)
Área 1	8	(-) 89°L	1065	1326	261	11,54
Área 2	8	91°O	1008	1320	312	13,80
Área 3	4	(-) 89°L	1054	1323	269	5,87
Área 4	4	91°O	1028	1325	297	6,49
Área 5	4	(-) 89°L	907	1323	416	6,71
Área 6	4	91°O	1086	1325	239	2,61
Área 7	8	3° O	977	1320	343	8,73
Área 8	8	(-) 177°L	1076	1258	182	6,15
Área 9	8	(-) 89°L	1042	1326	284	2,66
Área 10	8	91°O	938	1320	383	3,58
Total						68,13

Fonte: Do autor, 2018.

O Gráfico 2 ilustra a variação entre o sistema real e simulado, da potência gerada em função da potência instalada por ano.

Gráfico 2 – Energia gerada em função da potência instalada por ano



Fonte: Do autor, 2018.

A Tabela 13 traz os valores de geração da usina real para o período de 06 a 19 de maio de 2018, resultados da simulação 2 e das demais simulações realizadas da usina ideal com os três bancos de dados climáticos utilizados

Tabela 13 – Energia Anual: real e simulado

Situação	Geração (MWh/ano)
Usina real (junho 2017 a maio 2018, considerando perda anual de 0,8% - Total de 2,4% para o período)	244,97
Usina real sem sombreamento simulação	306,63
Usina Ideal (NIH-INMET)	334,10
Usina Ideal (Meteonorm 2006-2012)	361,10
Usina Ideal (NASA SEE 1983-2005)	347,56

Fonte: Do autor, 2018.

Salienta-se que para a obtenção de resultados mais precisos, faz-se necessário a medição da radiação global no local onde as placas do protótipo foram instaladas, além dos demais dados climáticos próximos a elas, como temperatura e velocidade do vento. Para maior confiabilidade do montante de energia gerada pelas placas do protótipo, faz-se necessário a medição da geração durante um período completo, um ano.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo de caso da Usina Fotovoltaica Tecnovates, realizando-se simulações de geração e breve análise econômica, caso a usina tivesse sido instalada no solo com orientação e inclinação fixas adequadas para o local. Utilizou-se de dados de radiação, temperatura e velocidade do vento de três fontes distintas, NASSA SSE, Meteonorm e INMET em conjunto com o NIH Univates. Além disso realizou-se a medição de um protótipo teste para comparação.

Verificou-se, neste estudo, a influência do sombreamento e demais agravantes no rendimento anual da usina, chegando a aproximadamente 26% de energia que deixa de ser gerada. No quesito econômico, conclui-se que uma das opções para tornar a usina mais rentável seria conecta-la ao mercado cativo de energia ou, instalar os módulos no solo com orientação e inclinação adequadas e continuar com ela conectada a modalidade do mercado livre. Na análise econômica não considerou-se custo adicionais com encargos e tributos caso conectada ao mercado cativo.



## REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações técnicas**. Jan, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 12 out. 2017.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **NBR 482/2012**. Abr, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2017.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **NBR 687/2015**. Nov, 2015. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2017.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatórios do Sistema de Apoio a Decisão**. Disponível em: < Agência Nacional de Energia Elétrica.>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- BAGHER, Askari Mohammad; VAHID, Mirzaei Mahmoud Abadi; MOHSEN, Mirhabibi. **Types of Solar Cells and Application**. American Journal of Optics and Photonics. Agosto, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajop>>. Acesso em: 03 set. 2017.
- BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. **Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Sistemas de Potência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Disponível em: <[www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)>. Acesso em: 29 out. 2017.
- BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. 2008. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br>>. Acesso em: 11 set. 2016.
- CANESTRARO, Carla Daniele. **Dispositivos Fotovoltaicos Orgânicos: Estudo de Camadas Ativas e Eletrodos**. 2010. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Disponível em:

<<http://www.tecnologia.ufpr.br/portal/pipe/teses-de-doutorado/>>. Acesso em: 21 out. 2017.

CONPET. **Ação Local - Benefício Global**. Jun. 2012. Disponível em: <[http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt\\_br/conteudo-gerais/conpet.shtml](http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/conpet.shtml)>. Acesso em: 26 ago. 2017.

ELETROBRAS. **Importância da Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/natrilhadaenergia/energia-eletrica/>> Acesso em: 26 ago. 2017.

FERREIRA, Antonio Domingos Dias. **Habitação autossuficiente: interligação e integração de sistemas alternativos**. 1 ed. RJ: Enteriência, 2014. E-book. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca>>. Acesso em: 25 set. 2016.

GTES, Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CRESEB, 2004. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/105527660/Manual-de-Engenharia-FV-2004>>. Acesso em: 12 abr. 2013.

HICKEL, 2016. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ACÚMULO DE SUJEIRA SOBRE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FV: REVISÃO E MEDIÇÕES DE CAMPO**. <<https://www.researchgate.net/publication/301544739>>. Acesso em: 29 set. 2017.

IEA ENERGY Technology Essentials - **Biomass for Power Generation and CHP**. IEA, 2007. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/essentials3.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2017.

INMET - Instituto Nacional de Metrologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Out. 2017.

KALOGIROU, Soteris A. **Engenharia de Energia Solar - Processos e Sistemas**. Tradução de Luciana Arissawa. Revisão Técnica Giuliano Arns Rampinelli. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

Manual módulos PV REC 260PE **BLK. SOLARMODULE MIT HÖCHSTLEISTUNG**. 2015.

MATAVELLI, Augusto César. **Energia solar: geração de energia elétrica utilizando células fotovoltaicas**. 2013. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2013/MEQ13015.pdf>>. Acesso em 10 out. 2017.

MEMORIAL DESCRITIVO. Universidade do Vale do Taquari – Univates, 2015.

MIRANDA, Evaristo Eduardo de. **Artigo - A sustentabilidade da energia**. Embrapa. Agosto, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/15486525/artigo---a-sustentabilidade-da-energia>>. Acesso em: 15 out. 2017.

MME, Ministério de Minas e Energias. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Mar. 2014. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/boletins-2014>> Acesso em: 27 ago. 2017.

MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo. Ano de referência - 2015**. Jun, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Eneria+Solar++Brasil+e+Mundo++ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>>. Acesso em: 10 out. 2017.

MME, Ministério de Minas e Energias. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Jun. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/boletins-2016>> Acesso em: 27 ago. 2016.

MME, Ministério de Minas e Energias. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Jun. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/boletins-2017>> Acesso em: 27 ago. 2017.

MOLINA JUNIOR, Walter F; ROMANELLI, Thiago Libório. **Recursos energéticos e ambiente**. Curitiba: InterSaberes, 2015. E-book. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca>>. Acesso em: 25 set. 2016.

NAM, Youngsuk; YENG, Yi Xiang; LENERT, Andrej; BREMEL, Peter; CELANOVIC, Ivan; SOLJAČIĆ, Marin; WANG, Evelyn N.. **Solar thermophotovoltaic energy conversion systems with two-dimensional tantalum photonic crystal absorbers and emitters**. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2014, 287–296. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/solmat](http://www.elsevier.com/locate/solmat)>. Acesso em 03 set. 2017.

NIH. Núcleo de informações Hidrometeorológicas. Disponível em: <<https://www.univates.br/nih/>>.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>>. Acesso em: 18 set. 2016.

ProGD. **Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3013891/15.12.2015+Apresenta%C3%A7%C3%A3o+ProGD/bee12bc8-e635-42f2-b66c-fa5cb507fd06?version=1.0>>. Acesso em: 10 jul, 2018.

PORTAL ENERGIA, Energias Renováveis. **Energia Fotovoltaica - manual sobre tecnologias, projecto e instalação.** 2004. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2017.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. **PRODIST, Módulo 3** - Acesso ao Sistema de Distribuição. Revisão 7. ANEEL, 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-3>>. Acesso em: 15 out. 2017.

PVSYT. **PVsynt Photovoltaic Software.** Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/en/>>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

REIS, Dartisson de Castro. **Análise crítica do processo de licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas.** 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. Disponível em <[https://www.ppgee.ufmg.br/diss\\_defesas\\_listagem.php](https://www.ppgee.ufmg.br/diss_defesas_listagem.php)>. Acesso em 21 out. 2017.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica.** 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2011. E-book. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca>>. Acesso em: 25 set. 2016.

RITEK, green. **Solar Module Structure.** Disponível em: <[http://www.riteksolar.com.tw/eng/p2-solar\\_modules.asp](http://www.riteksolar.com.tw/eng/p2-solar_modules.asp)>. Acesso em: 15 out. 2017.

SMA. **Sunny Tripower 5000TL / 6000TL / 7000TL / 8000TL / 9000TL.** Disponível em: <<http://testsite.solarjuice.com.au/wp-content/uploads/2016/06/Sunny-Tripower-5000-9000TL.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2017.

SANTOS, Marco Aurélio D.. **Fontes de energia nova e renovável.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013

SILVA, Clyon Gonçalves da. **De sol a sol: energia no Século XXI.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010. Disponível em: <<http://univates.bv3.digitalpages.com.br/users/publications/9788586238932/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiommo. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Interciencia: Rio de Janeiro, 2003

TOLMASQUIM, Mauricio Tiommo **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** EPE: Rio de Janeiro, 2016

UCZAI, Pedro; TAVARES, Wagner Marques; FILHO, Alberto Pinheiro de Queiroz. **Energias renováveis : riqueza sustentável ao alcance da sociedade.** Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 273 p. – (Série cadernos de altos estudos; n. 10). Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br/bd/handle/bdcamara/9229>>. Acesso em 25 ago. 2017.

UFRGS. **Física Moderna**. Disponível em:  
<[https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m\\_s02.html](https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod03/m_s02.html)>. Acesso em: 21 out. 2017.

ULHI. **Instalaciones solares fotovoltaicas puestas a rede**. 2017. Disponível em:  
<[http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF05/es\\_IEA\\_ISF05\\_Contenidos/website\\_index.html#](http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF05/es_IEA_ISF05_Contenidos/website_index.html#)>. Acesso em: 15 out. 2017.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Campinas, SP. 2012.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

ZILLES, Roberto, [et al.]. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.



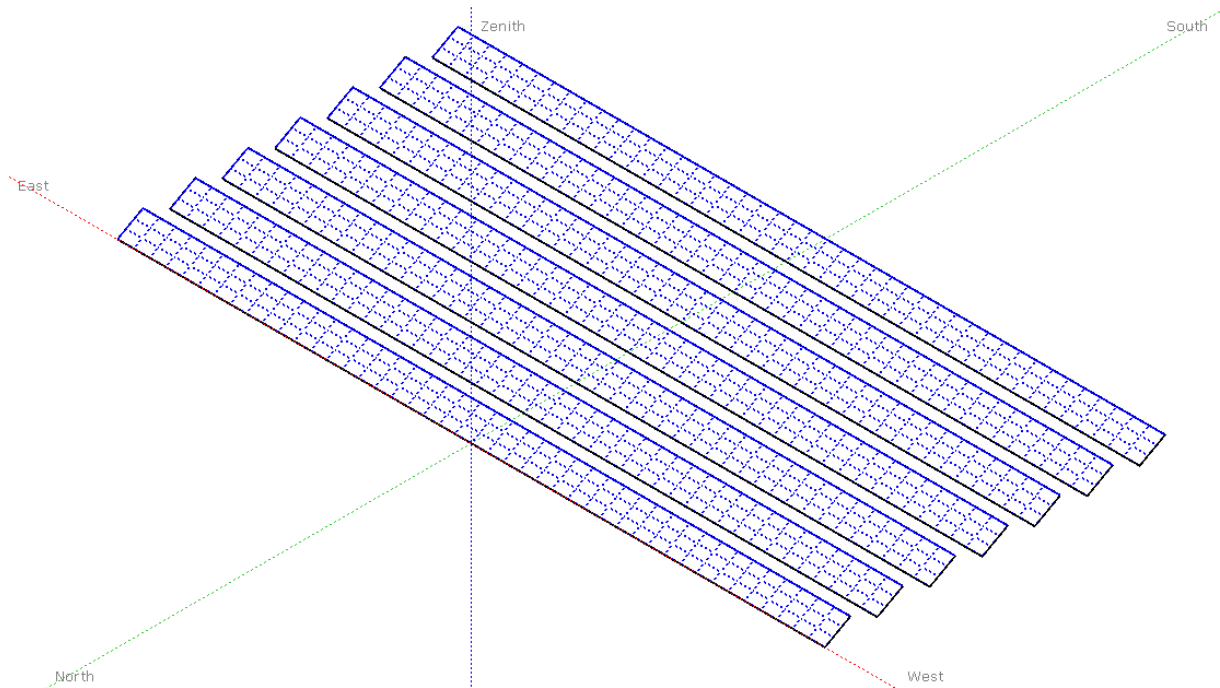
## APÊNDICES

## APÊNDICE A – ORIENTAÇÃO E INCLINAÇÃO DOS MÓDULOS

Nº de módulos	Inversor	Orientação	Inclinação (°)
72 62 36 36	WR1 WR6 WR9 WR11	-89° L	8° L
63 71 36 36	WR2 WR5 WR10 WR12	91° O	8° O
28 9 19 28	WR3 WR6 WR8 WR11	-89 L	4° L
28 28 28	WR4 WR7 WR12	91° O	4° O
10 42 10	WR2 WR3 WR8	-89 L	4° L
42	WR7	91° O	4° O
65 65	WR13 WR14	-177° L	8° S
49 49	WR15 WR16	3° O	8° N



APÊNDICE B – DISPOSIÇÃO DAS STRINGS



APÊNDICE C – DADOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS PARA SIMULAÇÕES DO NIH  
EM CONJUNTO COM DADOS DO INMET

Mês	Irradiação Global (W/m <sup>2</sup> )	Irradiação difusa (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Velocidade do vento (m/s)
Janeiro	241,4	111,7	25,2	3,50
Fevereiro	264,1	123,2	24,5	3,10
Março	190,3	83,3	23,4	2,20
Abril	160,8	60,8	23,5	2,00
Maio	115,7	45,2	19,1	2,00
Junho	101,3	48,6	16,6	2,90
Julho	136,3	60,8	17,1	3,10
Agosto	142,1	66,0	18,1	3,30
Setembro	147,6	75,3	21,5	3,60
Outubro	195,8	97,2	20,9	4,00
Novembro	254,7	112,2	21,4	3,80
Dezembro	255,6	111,7	25,0	3,80
Média	<b>183,4</b>	<b>82,8</b>	<b>21,4</b>	<b>3,10</b>

## APÊNDICE D – DADOS CLIMÁTICOS UTILIZADOS PARA SIMULAÇÕES DA NASA-SEE E METEONORM

### NASA-SSE (1983-2005)

Mês	Irradiação Global (W/m <sup>2</sup> )	Irradiação difusa (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Velocidade do vento (m/s)
Janeiro	250,8	105,8	23,7	
Fevereiro	225,4	95,4	23,3	
Março	199,2	78,4	22,5	
Abril	150,8	61,7	19,9	
Maio	127,0	46,6	16,4	
Junho	102,9	41,7	14,9	
Julho	111,7	43,3	14,3	
Agosto	142,5	54,2	16,1	
Setembro	167,1	72,9	17,2	
Outubro	205,0	89,1	19,5	
Novembro	247,5	101,3	21,2	
Dezembro	263,3	107,9	23,0	
Média	<b>182,6</b>	<b>74,7</b>	<b>19,3</b>	

### Meteonorm (2006-2012)

Mês	Irradiação Global (W/m <sup>2</sup> )	Irradiação difusa (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	Velocidade do vento (m/s)
Janeiro	267,3	123,3	27,0	4,01
Fevereiro	243,2	113,2	26,3	4,00
Março	216,1	94,4	25,4	3,90
Abril	172,2	77,9	21,4	3,50
Maio	131,0	56,9	17,6	3,39
Junho	109,0	43,7	15,6	3,40
Julho	116,0	52,7	14,7	3,71
Agosto	136,2	64,0	16,6	3,79
Setembro	175,1	89,3	17,1	3,39
Outubro	217,2	101,2	21,0	4,30
Novembro	270,8	117,4	23,0	4,29
Dezembro	286,2	116,0	25,1	4,30
Média	<b>194,8</b>	<b>87,3</b>	<b>20,9</b>	<b>3,90</b>

## **ANEXOS**

## ANEXO A – PLANTA DA SITUAÇÃO



## ANEXO B – DISTRIBUIÇÃO DOS MÓDULOS EM STRINGS

